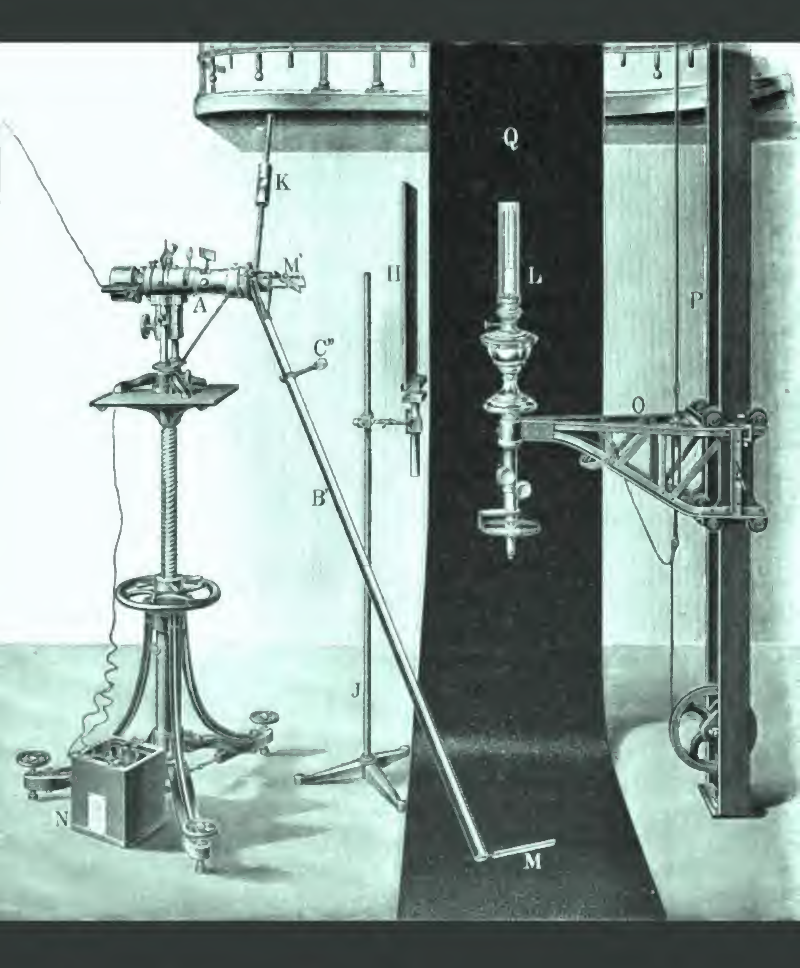


Praktische photometrie

Emil Liebenthal

Die Photometrie hat infolge der Fortschritte auf dem Gebiete der Beleuchtungstechnik in den letzten Jahren einen solchen Aufschwung genommen, daß die bisherigen Bücher über diesen Gegenstand den heutigen Ansprüchen nicht mehr ganz genügen. Das vorliegende Buch soll eine Darstellung der Photometrie nach dem neuesten Stande geben. Es ist zunächst für Laboratorien von Gasanstalten, Elektrizitätswerken, Lampenfabriken, sodann aber auch zum Studium für diejenigen Physiker, Techniker, Hygieniker, Lehrer bestimmt, welche sich auf diesem Gebiete noch weiter ausbilden wollen; mit anderen Worten: es soll nicht allein technischen, sondern zugleich auch wissenschaftlichen Kreisen dienen. Fast ausschließlich wurde elementare Mathematik benutzt. Zahlreiche Beispiele erläutern den Gebrauch der entwickelten Formeln.

Braunschweig, im September 1907.

Friedrich Vieweg und Sohn.



PRAKTISCHE

PHOTOMETRIE

PRAKTISCHE
PHOTOMETRIE

VON

DR. EMIL LIEBENTHAL
PROFESSOR UND MITGLIED DER PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN REICHSANSTALT
IN CHARLOTTENBURG

MIT 201 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN



BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1907

Published September 27, 1907.

VORWORT.

Die Photometrie hat in den letzten Jahren einen solchen Aufschwung genommen, daß die bisherigen Bücher über diesen Gegenstand, nämlich die von Krüss, Palaz und Stine, so vorzüglich sie auch für die Verhältnisse zur Zeit ihres Erscheinens waren, den heutigen Ansprüchen nicht mehr ganz genügen. Auf Anraten des Herrn Präsidenten Kohlrausch habe ich es versucht, diese Lücke auszufüllen. Hierbei kann ich mich auf meine langjährige Berufstätigkeit in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, sowie darauf stützen, daß ich durch Verkehr mit Fachmännern auf dem Gebiete des Beleuchtungswesens oft Gelegenheit hatte, die Bedürfnisse der Praxis kennen zu lernen. Allerdings bin ich mir schon von Anfang an der Schwierigkeiten, welche sich dieser Aufgabe entgegenstellen, wohl bewußt gewesen. Denn ein solches Buch muß zwar in erster Linie den in der *Praxis* Stehenden dienen, sodann aber auch den *wissenschaftlichen* Anforderungen genügen. Mithin muß dasselbe gemeinverständlich und wissenschaftlich zugleich sein. Deshalb suchte ich, soweit irgend angängig, mit der elementaren Mathematik auszukommen. Ausdrücklich muß aber darauf hingewiesen werden, daß allein die Fähigkeit, zuverlässige photometrische Einstellungen zu machen, nicht ausreicht, sondern daß immerhin ein, wenn auch bescheidenes Maß von mathematischen und physikalischen, zumal optischen Kenntnissen erforderlich ist, wenn man mit Erfolg photometrische Fragen erledigen will.

Die Bezeichnungen der photometrischen Größen und Einheiten entsprechen den auf dem Elektrikerkongreß zu Genf 1896 gefaßten Beschlüssen. Die in der Tabelle II auf S. 146 angegebenen Verhältniszahlen zwischen der Hefnerlampe, der 10-Kerzen-Pentanlampe und der Carcellampe sind von der Internationalen Lichtmeßkommission, welche vom 18. bis 20. Juli d. J. zum zweiten Male in Zürich zusammengetreten war, abgeändert worden. Die nunmehr endgültigen Zahlen finden sich in Tabelle XII auf S. 434; sie weichen von den auf S. 141 und 142 mitgeteilten Messungen der Reichsanstalt nur unwesentlich ab. Diese Kommissionsbeschlüsse sollten ursprünglich für das Erscheinen des Buches nicht mehr abgewartet werden; jedoch ließ

es sich noch ermöglichen, die Herausgabe so lange zu verschieben, daß die definitiven Werte im letzten Bogen aufgenommen werden konnten. Der Spektralphotometrie wurde, als außerhalb des Rahmens der praktischen Photometrie liegend, nur ein relativ kleiner Raum angewiesen. Das Kapitel XII gibt eine Zusammenstellung der von den wichtigsten Vereinen und Körperschaften aufgestellten Vorschriften für photometrische Messungen, und zwar sind diejenigen für elektrische Glühlampen und Gasglühlichtkörper in §§ 156 und 158 wörtlich wiedergegeben.

In den Anhängen sind solche Dinge behandelt, deren ausführlichere Besprechung im Texte den Zusammenhang gestört oder Wiederholungen nötig gemacht hätte. Die Anhänge 1 und 2 werden demjenigen, welcher mit Fehlerrechnungen, räumlichen Winkeln und dergleichen weniger vertraut ist, von Nutzen sein; ihm wird deshalb dringend geraten, diese Teile zu lesen, bevor er an den eigentlichen Text herantritt. In Anhang 5 ist — abgesehen von der Einleitung — die amtliche Publikation der Reichsanstalt über die Beglaubigung der Hefnerlampe in extenso abgedruckt, und zwar deshalb, weil diese Abhandlung jetzt nicht mehr den Beglaubigungsscheinen für die Hefnerlampe beigegeben wird. In Anhang 7 sind einige der gebräuchlichsten Aufgaben behandelt, welche den Zweck haben, dem Leser zur Anregung zu dienen.

Zahlreiche Beispiele erläutern den Gebrauch der entwickelten Formeln. Die Literaturhinweise erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit; jedoch habe ich mich bemüht, alle wichtigeren Nachweise zu bringen.

Charlottenburg, im September 1907.

Der Verfasser.

INHALT.

	Seite
Abkürzungen der berücksichtigten Literatur	XIII
Terminologie	XIV

Erstes Kapitel.

Quellen und Wesen des Lichtes.

§ 1.	Lichtempfindung. Lichtquellen	1
§ 2.	Verschiedene Strahlengruppen einer Lichtquelle	1
§ 3.	Verschiedene Wirkungen der Strahlen einer Lichtquelle	2
§ 4.	Grau-, Rot- und Weißglut	3
§ 5.	Temperaturstrahlung und Lumineszenz	4
§ 6.	Kurzer Überblick über die gebräuchlichsten Lichtquellen	6
§ 7.	Undulationstheorie	10

Zweites Kapitel.

Energetische Grundlagen.

A. Teilung eines Energiestromes beim Auftreffen auf einen beliebigen Körper.

§ 8.	Reflexions-, Durchlässigkeits- und Absorptionsvermögen	15
§ 9.	Reflexion	19
§ 10.	Durchlässigkeit	21
§ 11.	Strahlungsmessung	23

B. Bestrahlung (Lambertsche Gesetze).

§ 12.	Strahlender Punkt	26
§ 13.	Ein System strahlender Punkte	30
§ 14.	Strahlendes Flächenelement	31

C. Ausstrahlung.

§ 15.	Kirchhoffs Gesetz über das Verhältnis zwischen der Emission und Absorption	38
§ 16.	Herstellung des schwarzen Körpers	41
§ 17.	Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers, des blanken Platins und anderer Körper	43
§ 18.	Experimentelle Bestimmung des Verhältnisses zwischen Licht und Gesamtenergiestrom	49
§ 19.	Experimentelle Bestimmung des physikalischen Wirkungsgrades einer Lichtquelle	51
§ 20.	Das sogenannte mechanische Äquivalent der Lichteinheit	52
§ 21.	Ziele der Leuchttechnik	53

Drittes Kapitel.

Photometrische Grundlagen.

A. Physiologische Wirkung der Lichtstrahlen auf das Auge.

Seite

§ 22. Das Auge als optischer Apparat 56
§ 23. Die Netzhaut als lichtempfindliche Schicht 56
§ 24. Die Empfindung des Lichtes. Helligkeit 57
§ 25. Purkinjesches Phänomen 61
§ 26. Empfindlichkeit des Auges für Licht verschiedener Wellenlängen 63
§ 27. Das Auge als Energiemesser. Aufgaben der praktischen Photometrie 67
§ 28. Die Empfindung der Farbe 70

B. Lamberts photometrische Gesetze.

§ 29. Leuchtender Punkt 73
§ 30. System leuchtender Punkte und leuchtendes Flächenelement . . 75
§ 31. Prüfung der photometrischen Gesetze 80

C. Folgerungen aus den photometrischen Gesetzen.

§ 32. Ausgedehnte leuchtende Fläche und kleines beleuchtetes ebenes Flächenstück 89
§ 33. Von einem Flächenelement ausgesandter Gesamtlichtstrom . . . 90
§ 34. Flächenhelle eines beleuchteten, vollständig diffus reflektierenden Flächenelementes 91
§ 35. Beleuchtung eines orthotropen Körpers durch ein System von Lichtquellen 92
§ 36. Äquivalente Leuchtflächen 92

D. Stärke der Ausstrahlung.

§ 37. Zusammenhang zwischen Lichtstärke und Temperatur 94
§ 38. Zusammenhang zwischen Ökonomie und Temperatur 98

Viertes Kapitel.

Einheitslampen und Zwischenlichtquellen.

A. Bedingungen für eine Lichteinheit.

§ 39. Allgemeine Bedingungen 102
§ 40. Bedingungen für Flammen-Einheitslampen 103
§ 41. Bedingungen für Glühkörper-Einheitslampen 104

B. Flammen-Einheitslampen.

I. Ältere Dochtlampen.

§ 42. Die Kerze 105
§ 43. Die Carcellampe, Keateslampe und Pigeonlampe 107

II. Mit Leuchtgas gespeiste Lampen.

§ 44. Die Methvenlampe 109
§ 45. Die Giroudlampe 110

III. Die Hefnerlampe.

§ 46. Definition der Lichteinheit und Allgemeines 111
§ 47. Kurze Beschreibung der Lampe 112

Seite
§ 48. Einfluß des Brennstoffs 113
§ 49. Einfluß der Flammenhöhe sowie der Dochtrohrabmessungen und des Dochtrohrmaterials 115
§ 50. Einfluß der umgebenden Luft 116
§ 51. Mittel zur Beseitigung des Zuckens 121

IV. Pentanlampen.

§ 52. Kurzer Überblick über die Pentanlampen 122
§ 53. Dochtlose 1-Kerzen-Pentanluftgaslampe 122
§ 54. 1-Kerzen-Pentandochtlampe 123
§ 55. Dochtlose 10-Kerzen-Pentanluftgaslampe 126
§ 56. Der Brennstoff der 10-Kerzen-Pentanluftgaslampe 129

V. Neuere Vorschläge.

§ 57. Lampen mit flüssigem Brennstoff 130
§ 58. Lampen mit gasförmigem Brennstoff 131

C. Glühkörper-Einheitslampen.

§ 59. Die Schwendlersche Platin-Einheitslampe 132
§ 60. Die Violle sche Platin-Einheitslampe 133
§ 61. Die Simenssche Platin-Einheitslampe 135
§ 62. Platin-Einheitslampe von Lummer und Kurlbaum 136
§ 63. Vorschlag von Petavel 137
§ 64. Die Kraterlicht-Einheitslampe 138
§ 65. Der schwarze Körper zur Darstellung der Lichteinheit 139

D. Vergleichende Versuche zwischen den einzelnen Lichteinheiten.

§ 66. Auswertung der Violleschen Einheit 140
§ 67. Vergleich der Hefnerkerze mit den gebräuchlichsten Lichteinheiten 140
§ 68. Tabellarische Übersicht über ältere Vergleichungen von Lichteinheiten 143

E. Vereinbarungen über photometrische Größen und Einheiten.

§ 69. Geschichtliches über internationale Vereinbarungen 146
§ 70. Deutsche Beschlüsse über photometrische Größen und Einheiten . 149

F. Zwischenlichtquellen.

§ 71. Aufzählung der gebräuchlichsten Zwischenlichtquellen 151

Fünftes Kapitel.

Photometer (für gleichfarbige und nahezu gleichfarbige Lichtquellen).

A. Allgemeine Gesichtspunkte.

§ 72. Empfindlichkeit des Auges gegen kleine Helligkeits- und Kontrastunterschiede 154
§ 73. Weber-Fechnersches psychophysisches Gesetz 156
§ 74. Prinzip der photometrischen Messungen 156
§ 75. Terminologie 160

B. Anwendung des Entfernungsgesetzes.

Seite

§ 76. Das Schattenphotometer von Lambert 160
§ 77. Photometer von Bouguer und Foucault 161
§ 78. Das Photometer der Gas-Referees 162
§ 79. Das Photometer von Ritchie 162
§ 80. Photometer mit keilförmiger Anordnung der Photometerfelder . 163
§ 81. Diffusionsphotometer von Joly-Elster 164
§ 82. Das Bunsensche Photometer 165
§ 83. Gleichheitsphotometer von Lummer und Brodhun 172
§ 84. Kontrastphotometer von Lummer und Brodhun 180
§ 85. Photometer von Brücke 183
§ 86. Dachphotometer von L. Weber 184
§ 87. Das Milchglasplattenphotometer von L. Weber 184
§ 88. Photometeraufsatz von Martens 190
§ 89. Beleuchtungsmesser von Krüß 192
§ 90. Beleuchtungsmesser von Martens 194
§ 91. Interferenzphotometer von Lummer 196
§ 92. Photometer von Wheatstone, Masson und Pagliani 197

C. Schwächung durch andere Mittel als durch Entfernungsänderung.

§ 93. Das Schwächungsgesetz ist ebenfalls physikalischer Natur . . . 199
§ 94. Das Schwächungsgesetz ist physiologischer Natur 205
§ 95. Beleuchtungsmesser von Preece und Trotter, sowie von Wingen-Krüß 210
§ 96. Ältere Diaphragmen-Photometer 211
§ 97. Universalphotometer von Blondel und Broca 214
§ 98. Ältere Polarisationsphotometer 215
§ 99. Polarisationsphotometer von Martens 219
§ 100. Beleuchtungsmesser von Classen 223
§ 101. Straßenphotometer von Brodhun 224

Sechstes Kapitel.

Photometrieren verschiedenfarbiger Lichtquellen.

§ 102. Schwierigkeiten des Photometrierens 229

A. Einstellung auf gleiche Helligkeit.

§ 103. Anwendung von farbigen Mitteln 231
§ 104. Kompensationsmethode von Wybauw 235
§ 105. Substitutionsverfahren 238
§ 106. Direkter Vergleich 238

B. Methode gleicher Sehschärfe.

§ 107. Sehschärfenprinzip 240
§ 108. Methoden von Weber 242
§ 109. Beleuchtungsmesser von Houston und Kennelly 244

C. Flimmerphotometrie.

§ 110. Flimmerprinzip 244
§ 111. Flimmerphotometer von Whitman, Rood und Bechstein . . 245
§ 112. Flimmerphotometer von Simmance und Abady 247
§ 113. Flimmerphotometer von Krüß 248

Siebentes Kapitel.

Spektralphotometrie.

Seite
§ 114. Spektroskop 250
§ 115. Bestimmung der Lichtstärken der verschiedenen Farben einer Lichtquelle 251

Vergleich der Lichtstärken gleicher Farben zweier Lichtquellen (eigentliche Spektralphotometrie).

§ 116. Anordnung der photometrischen Vorrichtung 256
§ 117. Vierordts Spektralphotometer 257
§ 118. Glansches Spektralphotometer 258
§ 119. Das Spektralphotometer von König 259
§ 120. Spektralphotometrische Anordnung von Hagen und Rubens für Reflexionsmessungen 264
§ 121. Spektralphotometer von Lummer und Brodhun 266
§ 122. Das Spektralphotometer von Brace 267

Achtes Kapitel.

Bestimmung von mittleren Lichtstärken.

A. Definitionen.

§ 123. Lampenachse 268
§ 124. Mittlere Lichtstärken 269

B. Berechnung der mittleren räumlichen Lichtstärke und der hemisphärischen Lichtstärken.

§ 125. Methode 1 (Rechnerisches Verfahren) 272
§ 126. Methode 2 (Rechnerisches Verfahren) 276
§ 127. Methode 3 (Graphisches Verfahren) 279

C. Bestimmung der mittleren räumlichen Lichtstärke und der hemisphärischen Lichtstärken.

I. Durch Messung in vielen Ausstrahlungsrichtungen.

§ 128. Allgemeiner Überblick 284
§ 129. Neigung des Photometerschirmes 285
§ 130. Benutzung eines einzigen Spiegels 288
§ 131. Benutzung von zwei und mehreren Spiegeln 292
§ 132. Relative Messungen 295
§ 133. Stative für elektrische Glühlampen 296

II. Durch eine einzige Messung oder wenige Messungen.

§ 134. Lumenmeter von Blondel 297
§ 135. Kugelphotometer von Ulbricht 301
§ 136. Photomesometer von Blondel 304
§ 137. Integralphotometer von Matthiews 306

Neuntes Kapitel.

Photometrische Einrichtungen.

§ 138. Die gerade Photometerbank 309
§ 139. Abblenden fremden Lichtes 313

Seite
§ 140. Hilfsapparate für Messungen von elektrischen Lampen 315
§ 141. Hilfsapparate für die Prüfung von Lampen mit gasförmigem Brennstoff 319
§ 142. Hilfsapparate für die Prüfung von Lampen mit flüssigem Brennstoff 321
§ 143. Feuchtigkeitsmesser 322
§ 144. Photometerräume 323

Zehntes Kapitel.

Lichtverteilung und spezifischer Verbrauch der gebräuchlichsten Lichtquellen.

§ 145. Terminologie 327
§ 146. Elektrische Kohlenfaden-Glühlampen 328
§ 147. Nernstlampen 338
§ 148. Elektrische Metallfaden-Glühlampen 340
§ 149. Bogenlampen 342
§ 150. Lampen mit gasförmigem Brennstoff 351
§ 151. Lampen mit flüssigem Brennstoff 358
§ 152. Vergleich zwischen den verschiedenen Lichtquellen in wirtschaftlicher Hinsicht usw. 360

Elftes Kapitel.

Verteilung der Beleuchtung.

§ 153. Bestimmung der Beleuchtung aus Lichtstärkenwerten 361
§ 154. Beleuchtung von Straßen und freien Plätzen 370
§ 155. Beleuchtung von Innenräumen 375

Zwölftes Kapitel.

Vorschriften für photometrische Prüfungen.

§ 156. Vorschriften für die Lichtmessung von elektrischen Glühlampen 378
§ 157. Vorschriften für das Photometrieren des Leuchtgases 381
§ 158. Vorschriften für die Prüfung von Gasglühlichtkörpern 384

Anhang.

Anhang 1. Arithmetische Beziehungen 387
Anhang 2. Geometrische Beziehungen 392
Anhang 3. Auftreffen von Licht auf sog. durchsichtige Körper 396
Anhang 4. Mittelbare Lichtstrahlung 402
Anhang 5. Beglaubigung der Hefnerlampe 411
Anhang 6. Bestimmung hoher Temperaturen mittels Strahlungsmessungen 419
Anhang 7. Übungsaufgaben 422
Tabellen I bis XII 429
Namen- und Sachregister 435

ABKÜRZUNGEN DER BERÜCKSICHTIGTEN LITERATUR.

(Abkürzungen, welche an sich vollständig verständlich sind, werden hier nicht mitgeteilt.)

Ann. Chim. Phys. = Annales de chimie et de physique.
Ann. d. Phys. = Annalen der Physik.
Astrophys. J. = The Astrophysical Journal; Chicago.
Beibl. = Beiblätter zu den Annalen der Physik.
Berl. Ber. = Sitzungsberichte der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin.
Bull. Soc. Franç. Phys. = Bulletin des Séances de la Société Française de Physique.
Bull. Soc. Int. Électr. = Bulletin de la Société Internationale des Électriciens.
Chem. News = The Chemical News; London.
C. r. . . . = Comptes rendus . . .
C. R. = Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Academie des Sciences.
Electrician = The Electrician; London.
Electr. (oder El.) World = The Electrical World and Engineer; New York.
Eng. = Engineering; London.
E. T. Z. = Elektrotechnische Zeitschrift.
F. d. Phys. = Fortschritte der Physik.
Gilb. Ann. = Gilberts Annalen.
J = Journal (deutsch, französisch oder englisch).
J. d. Phys. = Journal de Physique théorique et appliquée.
J. f. G. u. W. = Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung.
L'Éclair. électr. = L'Éclairage électrique.
Lum. électr. = La Lumière électrique.
Mél. phys. et chim. = Mélanges physiques et chimiques (St. Pétersbourg).
Münch. Ber. = Sitzungsberichte der math.-physik. Klasse der Königl. Bayer. Akademie der Wissenschaften zu München.
Phil. Mag. = The Philosophical Magazine and Journal of Science; London.
Phil. Transact. = Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
Phys. Review = The Physical Review; New York, London und Berlin.
Phys. Z. = Physikalische Zeitschrift.
Pogg. Ann. = Poggendorffs Annalen.
Proc. Am. Acad. = Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences.
Proc. Cambridge Phil. Soc. = Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.
Proc. Edinb. Soc. = Proceedings of the Royal Society of Edinburgh.
Proc. Phys. Soc. = Proceedings of the Physical Society of London.
Proc. Roy. Soc. = Proceedings of the Royal Society of London.
Rep. Brit. Assoc. = Report of the Britisch Association for the Advancement of Science.
Rep. f. Phys. = Karls Repertorium für Experimentalphysik.

Sill. J. = Sillimans Journal = The American Journal of Science and Arts.

Trans. Amer. Inst. Electr. Eng. = Transactions of the American Institute of Electrical Engineers.

Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. = Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, vor 1899 Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft in Berlin.

Wied. Ann. = Wiedemanns Annalen.

Wien. Ber. = Sitzungsberichte der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften zu Wien, math.-naturw. Klasse.

Z. = Zeitschrift.

Z. f. Bel. = Zeitschrift für Beleuchtungswesen.

Z. f. Instrk. = Zeitschrift für Instrumentenkunde.

TERMINOLOGIE.

Es bedeutet:

A Absorptionsvermögen (S. 16).

B Bestrahlung (S. 14).

$\mathfrak{C}$ Gesamtverbrauch einer Lichtquelle (S. 327).

$\mathfrak{C}_m = \mathfrak{C}/J_m$; $\mathfrak{C}_s = \mathfrak{C}/J_s$ usw. spezifischer Verbrauch (S. 327).

D regelmäßiges Durchlässigkeitsvermögen (S. 16).

E Beleuchtung (S. 74).

e Flächenhelle (S. 76) — mit Ausnahme der jedesmal kenntlich gemachten Fälle, wo e die Basis des natürlichen Logarithmensystems ist.

G Energiestrom (S. 27).

HK Hefnerkerze (S. 111).

J bzw. J_1, J_2, J_a, J_n die Lichtstärke von L bzw. L_1, L_2, L_a, L_n.

J_m mittlere Lichtstärke von L senkrecht zur Lampenachse, bzw. mittlere horizontale Lichtstärke (S. 269).

J_s mittlere räumliche Lichtstärke von L (S. 270).

$J_{s,o}$ bzw. $J_{s,u}$ obere bzw. untere hemisphärische Lichtstärke von L (S. 270).

$J(\vartheta)$ mittlere Lichtstärke von L unter der Poldistanz ϑ (S. 269).

$J(\vartheta, \varphi)$ Lichtstärke von L in der Ausstrahlungsrichtung ϑ, φ (S. 269).

i Einfallswinkel (S. 29).

L zu messende Lampe (S. 160).

L_1, L_2 allgemein: die beiden zu vergleichenden Lampen (S. 160).

Lm Lumen (S. 149).

Lx Lux (S. 150).

L_a (konstante) Vergleichslampe (S. 160).

L_n Normallampe bzw. Einheitslampe (S. 160).

M diffuses Reflexionsvermögen (S. 16).

m Reflexionskoeffizient (S. 79).

R regelmäßiges Reflexionsvermögen (S. 16).

r allgemein: einen Abstand; speziell bei Formeln für photometrische Apparate: den sich bei der photometrischen Einstellung ergebenden Abstand zwischen L und dem von L beleuchteten Photometerfeld (S. 160).

r_1, r_2, r_a, r_n bei Formeln für photometrische Apparate: die entsprechenden Abstände für L_1, L_2, L_a, L_n (S. 160).

s Element oder kleines Stück einer bestrahlten bzw. beleuchteten Fläche (S. 28, 59, 74).

T diffuses Durchlässigkeitsvermögen (S. 16).

t Durchlässigkeitskoeffizient (S. 88).

U Strahlungsstärke (S. 27).

ε Ausstrahlungswinkel (S. 31).

H Emissionsvermögen eines schwarzen Körpers (S. 43).

η Emissionsvermögen eines beliebigen Körpers (S. 32, 36, 43).

Θ absolute Temperatur (S. 43).

ϑ Poldistanz (S. 269).

σ Element oder kleines Stück einer strahlenden bzw. leuchtenden Fläche (S. 31, 75).

Φ Lichtstrom (S. 74).

Ω und ω räumlicher Winkel (S. 27, 34, 393).

Erstes Kapitel.

Quellen und Wesen des Lichtes.

§ 1. Lichtempfindung. Lichtquellen.

Jede Reizung des Sehnerven veranlaßt eine *Lichtempfindung.* Eine Lichtempfindung entsteht z. B. durch einen äußeren Druck auf das geschlossene Auge, durch eine elektrische Entladung, durch den Druck des Blutes (Flimmern vor geschlossenen Augen). In den überwiegend meisten Fällen dient als Reizmittel jenes Etwas, das die Körper der Außenwelt auf die Netzhaut senden. Dieses Agens wird objektives Licht oder kurz *Licht* genannt. Unter subjektivem Licht oder *Lichtstrom* versteht man den der Größe nach unbekannten physiologisch beeinflußten Teil des den Sehnerven reizenden Lichtes, welchen wir empfinden, d. h. den physiologischen Wert des Lichtes (§ 27). Die Bezeichnung Lichtstrom wurde von dem internationalen Elektrikerkongreß zu Genf 1896 (§ 69) gewählt; sie ist auch von den für die Lichtmessungen maßgebenden Kreisen in Deutschland angenommen und hat sich seitdem mehr und mehr eingebürgert.

Jeder Körper, welcher Licht (Lichtstrahlen) aussendet, dadurch also sichtbar wird, heißt leuchtend. Leuchtet er aus eigener Kraft, so heißt er Selbstleuchter oder *Lichtquelle*, sonst Nichtselbstleuchter. Ein Nichtselbstleuchter wird erst dadurch sichtbar, daß er von einem Selbstleuchter Licht erhält.

§ 2. Verschiedene Strahlengruppen einer Lichtquelle.

Bekanntlich geben die Sonne und unsere gebräuchlichen Lichtquellen ein farbiges, von Rot bis Violett reichendes Spektrum (§ 114). Mittels eines empfindlichen Temperaturmessers (§ 11) beobachtet man nicht nur an jeder Stelle dieses sichtbaren Spektrums, sondern auch noch jenseits des roten und violetten Endes Wärmewirkungen. Fängt man das Spektrum auf einer photographischen Platte von geeigneter Beschaffenheit auf, so werden die Silbersalze nicht nur im sichtbaren Spektrum, sondern auch jenseits des violetten und roten Endes zersetzt.

Das sichtbare Spektrum besitzt also über beide Enden hinaus Fortsetzungen, welche als ultrarotes und ultraviolettes Spektrum bezeichnet werden. Hieraus folgt, daß unsere Lichtquellen außer den *Lichtstrahlen*, welche einen Eindruck auf den Gesichtssinn machen und in das sichtbare Spektrum fallen, auch noch die sogenannten *ultravioletten* und *ultraroten* Strahlen aussenden, welche auf das Auge nicht wirken, also zur Beleuchtung nicht beitragen. Die ultraroten Strahlen werden häufig auch dunkle Wärmestrahlen genannt, weil sie hauptsächlich durch ihre Wärmewirkung erkannt werden. Wenn man das sichtbare Spektrum abblendet, kann man nach Helmholtz noch bis ans Ende des ultravioletten Sonnenspektrums, ferner noch einen kleinen Teil des ultraroten Spektrums sehen.

Jeder Stelle des Spektrums entspricht eine nicht mehr zu zerlegende Strahlenart, d. h. ein Strahl von bestimmter Brechbarkeit. Da das Spektrum der erwähnten Lichtquellen ein zusammenhängendes ist, so folgt ferner, daß in jeder der drei Gruppen (den sichtbaren, ultraroten und ultravioletten Strahlen) Strahlen von allen stetig ineinander übergehenden Graden der Brechbarkeit vorkommen. Diese drei Gruppen von Strahlen sind sich wesensgleich, da sie nach denselben Gesetzen reflektiert, gebrochen, polarisiert usw. werden. Sie unterscheiden sich lediglich durch ihre verschiedene Brechbarkeit. Daß wir einen Unterschied machen, liegt nur an der Eigentümlichkeit unseres Auges, daß es nur für Strahlen mittlerer Brechbarkeit empfindlich ist und diese Strahlen je nach der Brechbarkeit als verschiedenfarbig empfindet. Gemeinsam haben *alle Strahlen*, daß sie *Wärmestrahlen* sind. Mit anderen Worten: jeder Strahl führt einen gewissen Energiestrom mit sich, welcher sich beim Auftreffen auf die Körper in fühlbare Körperwärme, d. h. nach der mechanischen Wärmetheorie in lebendige Kraft der schwingenden Bewegung der kleinsten Teilchen der Körper umsetzt.

Eine Strahlung, welche nur eine einzige Strahlenart aussendet, heißt *homogen;* eine solche, welche mehrere Strahlenarten aussendet, heißt *gemischt*. Glühende feste und flüssige Körper geben ein zusammenhängendes Spektrum, besitzen also eine gemischte Strahlung. Dagegen liefern Gase und Dämpfe einzelne charakteristische Spektrallinien, haben also eine homogenere Strahlung; z. B. gibt Natriumdampf die beiden dicht nebeneinander liegenden gelben D-Linien.

Das homogene Licht ist am meisten, das der gebräuchlichen Lichtquellen sehr wenig, das der Sonne am wenigsten gesättigt. Das letztere wird als farblos bezeichnet.

§ 3. Verschiedene Wirkungen der Strahlen einer Lichtquelle.

Man kann im wesentlichen folgende Wirkungen unterscheiden:

1. die Erwärmung, welche, wie wir eben sahen, von allen Strahlen hervorgebracht wird;

2. die physiologische Wirkung auf das Auge, d. h. die Lichtwirkung, welche auf einen relativ kleinen Bereich von Strahlenarten beschränkt bleibt;

3. die chemischen Wirkungen, welche je nach der Beschaffenheit des bestrahlten Körpers von den allerverschiedensten Strahlenarten erzeugt werden. Auf die gewöhnliche photographische Platte wirken vorzugsweise die violetten und ultravioletten Strahlen; jedoch konnte man in neuerer Zeit Bromsilber von solcher Beschaffenheit erzeugen, daß die ultraroten Strahlen ebenso stark wie die blauen wirken;

4. die Erregung der Fluoreszenz und Phosphoreszenz, welche in den meisten Fällen von den ultravioletten Strahlen herrührt;

5. die elektrische Entladung und Ladung von Metallen (Hertz, Elster und Geitel, Lenard).

Diese verschiedenen Wirkungen rühren nicht von verschiedenen Strahlen her, sondern die nämlichen Strahlen können je nach der Beschaffenheit der Körper, auf welche sie auffallen, verschiedene Wirkungen, z. B. die Lichtstrahlen alle aufgeführten Wirkungen, hervorbringen.

§ 4. Grau-, Rot- und Weißglut.

Wenn man einen festen Körper, z. B. ein Platinblech, mittels eines elektrischen Stromes allmählich erwärmt, so werden von unseren Sinnen zunächst nur die dunkeln Wärmestrahlen wahrgenommen. Die dem Körper genäherte Hand hat die Empfindung der Wärme, während die ins Auge fallenden Strahlen den Sehnerven nicht reizen. Der Körper ist dann für uns eine Wärmequelle, aber keine Lichtquelle. Bei einer gewissen Temperatur beginnen die Strahlen auch auf den Sehnerven einen Reiz auszuüben; der Körper beginnt also auch Lichtstrahlen auszusenden; er wird nun auch eine Lichtquelle. Die ersten sichtbaren Strahlen sind jedoch nur bei sorgfältigster Beobachtung in einem völlig verdunkelten Raume wahrnehmbar und erwecken eine farblose Empfindung: der Körper erscheint in einem äußerst schwachen dunkelgrauen Lichte. Diese Erscheinung wird von Weber [1]), welcher sie zuerst beobachtete, mit „*Grauglut*" bezeichnet. Bei weiterer Temperatursteigung geht das Dunkelgrau in Hellgrau, dann Gelblichgrau und endlich in einen lichten feuerroten Farbenton über, womit (bei einer Temperatur von etwa 525°) die *Rotglut* beginnt. Wird die Temperatur weiter gesteigert, so geht der Farbenton durch Orange und Gelb (Gelbglut bei etwa 1000°) schließlich in Weiß (*Weißglut*, Beginn derselben bei etwa 1200°) über, wie wenn zu den roten Strahlen die gelben, blauen, violetten allmählich hinzutreten. Mit zunehmender Temperatur nimmt dabei die Wärme- und Lichtwirkung außerordentlich zu, und zwar die letztere noch mehr als die Wärmewirkung. Im Spektrum

[1]) Wied. Ann. 32, 256 (1887).

erblickt man bei beginnender Grauglut zunächst nur einen grauen Streifen, der an derjenigen Stelle liegt, wo bei beträchtlich gesteigerter Temperatur die blaugrünen Strahlen auftreffen. Dieser Streifen erweitert sich dann allmählich nach beiden Seiten.

Die Temperatur der beginnenden Grauglut ist bei verschiedenen Körpern verschieden; sie beträgt nach v. Emden bei Gold 423°, bei Neusilber 403°, nach Lummer beim schwarzen Körper (vgl. § 16) unter den günstigsten Bedingungen 360°. Auch die Temperatur der beginnenden Rotglut hängt von der Natur des glühenden Körpers ab. Der von Draper 1847 aufgestellte Satz, daß alle Körper erst mit der Rotglut und bei der gleichen Temperatur von 525° zu glühen beginnen, ist also nicht richtig (§ 28). Bei den Weberschen Versuchen erschien der benutzte Körper, nämlich der Kohlenfaden einer elektrischen Glühlampe, bei beginnender Grauglut in einem gespenstergrauen oder düsternebelgrauen, unstet glimmenden, auf und ab huschenden Lichte, und das Gespensterhafte der Erscheinung hörte erst mit dem Eintritt der Rotglut auf. Wie Lummer zuerst zeigte, tritt ein gespensterhaftes Aussehen überhaupt nicht auf, wenn der glühende Körper so breit ist, daß sein Netzhautbild größer als die fovea centralis (§ 23) ist.

§ 5. Temperaturstrahlung und Lumineszenz.

Die Lichtquellen lassen sich in zwei Klassen teilen: Entweder wird die Lichtstrahlung des Körpers ausschließlich durch seine hohe Temperatur veranlaßt; diesen Vorgang nennt man nach R. v. Helmholtz *Temperaturstrahlung*, nach Warburg *thermactine* Strahlung. Oder es spielt bei der Lichtstrahlung die Temperatur nur eine untergeordnete Rolle; dieser Vorgang wird nach E. Wiedemann als *Lumineszenz*, nach Warburg als *allactine* Strahlung bezeichnet.

Temperaturstrahlung.

Infolge der hohen Temperatur leuchten unsere sämtlichen bisher gebräuchlichen Lichtquellen. Sie alle haben das gemeinsam, daß ein fester Körper entweder unter Wirkung der Flammenhitze oder durch einen elektrischen Strom zum Glühen gebracht wird, und zwar ist die Lichtentwickelung um so stärker, auf je höhere Temperatur der Körper gebracht wird.

Bei den leuchtenden Flammen (Kerze, Petroleum-, Leuchtgas-, Acetylenflamme) glüht Kohlenstoff. Derselbe wird durch Zersetzung des Brennstoffs, welcher im allgemeinen aus kohlenwasserstoffhaltigen Verbindungen besteht, im festen Zustande und in feinster Verteilung in der Flamme ausgeschieden.

In anderen Fällen wird ein fester Körper von außen her in die sehr heiße, aber nicht leuchtende Flamme gebracht; z. B. beim Drummondschen Kalklicht ein Kalkzylinder, beim Magnesia- und

Zirkonlicht ein Zylinder aus Magnesia oder Zirkonerde in ein Knallgasgebläse; beim Fahnehjelmschen Glühlicht ein Kamm aus Magnesianadeln in die Wassergasflamme; beim Gasglühlicht ein Gewebe von etwa 99 Proz. Thoroxyd und 1 Proz. Ceroxyd in die Bunsenflamme.

Bei den elektrischen Glühlampen wird ein Kohlenfaden oder ein Stäbchen aus einem Leiter zweiter Klasse (Elektrolyt), z. B. Magnesia, Zirkonoxyd, Yttriumoxyd, oder ein Osmiumfaden bzw. ein Faden aus einer Osmiumlegierung als Glühkörper benutzt, welcher infolge seines hohen elektrischen Widerstandes zum Leuchten gebracht wird, wenn man einen elektrischen Strom durch ihn hindurchschickt. Beim Bogenlicht spielt die kurze Luftstrecke zwischen den beiden Elektroden (Kohlenstäben oder Stäben aus Elektrolytmasse) die Rolle des schlechten und sich erhitzenden Leiters, der seinerseits die Enden der Elektroden in helle Weißglut versetzt.

Infolge von Lumineszenz leuchten:

die Schwefelkohlenstoffflamme, welche schon bei einer Temperatur von etwa 150° ein bläuliches, wenn auch schwaches Licht aussendet;

gewisse lebende Organismen, z. B. der Leuchtkäfer und die das Meeresleuchten veranlassenden Infusorien;

Phosphor und faulendes Holz bei langsamer Oxydation;

die phosphoreszierenden und fluoreszierenden Körper, welche z. B. auch durch Röntgen- und Kathodenstrahlen zu besonders lebhaftem Leuchten erregt werden;

die in Geißlerschen Röhren elektrisch erregten Gase und Dämpfe (Teslas Licht, Lumineszenzlampe von Ebert, Quecksilberbogenlampe);

die Dämpfe und Gase in den Flammen, wofern das Spektrum hauptsächlich aus einzelnen Spektrallinien besteht; und zwar weicht nach Pringsheim die Strahlung um so weiter von der reinen Temperaturstrahlung ab, je homogener sie ist.

Dagegen bilden die in letzter Zeit sehr in Aufnahme gekommenen Bogenlampen mit farbigem Lichtbogen, die sogenannten Flammenbogenlampen, ein Bindeglied zwischen Lumineszenz und Temperaturstrahlung. Die Kohlen dieser Lampen sind mit gewissen Salzen (z. B. Strontium-, Barium-, Calcium-, Siliciumverbindungen) getränkt, welche im Lichtbogen in Dampfform ausgeschieden werden. Diese Dämpfe lumineszieren, während die Kohlen infolge ihrer hohen Temperatur leuchten. Während bei den gewöhnlichen Gleichstrombogenlampen nach einer ungefähren Schätzung der Lichtbogen nur 5 Proz., dagegen der Krater 85 Proz., die negative Kohle 10 Proz. des gesamten Lichtes ausstrahlt, ist der Lichtbogen der Flammenbogenlampen infolge seiner Lumineszenz in einem weit größeren Prozentsatz an der Lichtstrahlung beteiligt.

§ 6. Kurzer Überblick über die gebräuchlichsten Lichtquellen.

a) Lampen mit flüssigem und festem Brennstoff.

Bis gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurde zur Beleuchtung außer ganz primitiven Vorrichtungen (Kienspan, Steinkohlenfeuer, Unschlitt-, Talg- und Wachskerze) nur die antike Öllampe benutzt. Aber auch die Öllampe befand sich auf einer sehr niedrigen Entwickelungsstufe. Mittels eines runden Volldochts wurde der in freier Luft verbrennenden Flamme der Brennstoff zugeführt, welcher aus Fett oder vegetabilischem Öl bestand. Infolge zu geringer Luftzufuhr war die Verbrennung nur unvollkommen und die Temperatur verhältnismäßig niedrig; es entwickelte sich deshalb eine schwach leuchtende, rötliche Flamme, aus welcher außer gesundheitsschädlichen Verbrennungsprodukten, z. B. Kohlenoxydgas, auch der noch unverbrannte Kohlenstoff in Rußwolken emporstieg. Wesentlich verbessert wurde die Öllampe durch den von Argand 1787 erfundenen Rundbrenner, bei welchem ein zylindrischer Hohldocht benutzt, und der Flamme von außen und innen Luft zugeführt wurde. Zur Beförderung dieser doppelten Luftzufuhr wurde über der Flamme ein Metallschornstein angebracht. Der letztere wurde bald durch einen Glaszylinder ersetzt, welcher in der Höhe der Flamme mit einer Einschnürung versehen war und den Zweck hatte, die Verbrennungsluft am Orte der Einschnürung möglichst innig mit der Flamme in Berührung zu bringen. Durch die hierdurch erzielte vollständige Verbrennung (Verbrennungsprodukte bei reinen Kohlenwasserstoffen: Wasserdampf und Kohlensäure) wurde eine verhältnismäßig stark leuchtende, nicht rußende, weiße Flamme erzeugt. Von Carcel (§ 43) wurde 1800 die Argandlampe noch dadurch verbessert, daß er den bisher seitlich angebrachten Flüssigkeitsbehälter in den Fuß der Lampe brachte und den Brennstoff von dort durch eine mittels Uhrwerks betriebene Pumpe zur Flamme emporführte. Aus dieser Lampe entstand 1837 die von Franchot konstruierte Moderateurlampe, bei welcher das Öl durch den Druck einer sich ausdehnenden Spiralfeder in einem Röhrchen in den Brenner getrieben wird. Noch einfacher wurden die Lampen, als seit 1858 das vegetabilische Öl durch Mineralöl (Petroleum, Solaröl usw.) verdrängt wurde. Es konnten dann die ziemlich komplizierten Vorrichtungen zum Emporführen des Brennstoffs wegfallen, da der letztere allein durch die Kapillarwirkung des Dochtes gehoben wird. Bei dem hohen Kohlenstoffgehalt der Mineralöle ist eine kräftige Luftzufuhr erforderlich, welche durch geeignete857gläser, Brennscheiben usw. gefördert wird. Jedoch ist eine zu starke Luftzufuhr zu vermeiden; es kann dann die Flamme zu stark abgekühlt oder die Temperatur der Flamme erheblich erhöht und gleichzeitig der Verbrennungsprozeß des

ausgeschiedenen Kohlenstoffs so stark beschleunigt werden, daß der letztere überhaupt nicht als leuchtender Körper in der Flamme auftritt. Dieser Fall tritt bekanntlich auch beim Bunsenbrenner ein. Die Regulierung der Luftzufuhr kann daher bei gegebenem Brennstoff nicht über eine gewisse, von der Natur des letzteren abhängige Grenze hinaus die Lichtstärke erhöhen.

Mit dem Aufblühen der chemischen Technik gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurden auch die Kerzen wesentlich verbessert.

b) Lampen mit gasförmigem Brennstoff.

Leuchtende Flamme. Schon zu Ende des 17. Jahrhunderts verstand man, aus Steinkohlen Gas herzustellen. Die eigentliche Gasbeleuchtung beginnt jedoch erst 1792, wo der Engländer Murdoch seine Besitzung mit Steinkohlengas beleuchtete. 1812 wurde in London, 1824 in Hannover die Gasbeleuchtung für die Straßen eingeführt; dann folgten die anderen Städte des Festlandes, z. B. Berlin 1826. Bis in die siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts verwandte man zur Erzeugung des Leuchtgases vorwiegend die gewöhnliche Steinkohle. Als dann infolge der Konkurrenz in der Beleuchtungstechnik das Lichtbedürfnis wuchs, setzte man zur Erzielung eines lichtstärkeren Gases zu den Steinkohlen besondere Kohlen, z. B. die Cannel- und Bogheadkohle hinzu, oder man karburierte das gewöhnliche Steinkohlengas mit den Dämpfen von leicht flüchtigen kohlenstoffreichen Kohlenwasserstoffen, wie Benzol, Petroleumäther usw. Besonders in Amerika wurde karburiertes Wassergas zu Leuchtzwecken bevorzugt. In selteneren Fällen wurde auch Holzgas, Torfgas, Fettgas (in Eisenbahnwagen) u. dgl. verwendet. Seit etwa zehn Jahren ist das Acetylen erfolgreich in den Wettbewerb getreten.

Die hauptsächlichsten Brenner für gewöhnliches und aufgebessertes Steinkohlengas sind folgende:

1. der Einloch- oder Strahlenbrenner,
2. der Schnitt- oder Schlitzbrenner,
3. der Manchester- (Zweiloch- oder Fischschwanz-)brenner,
4. der Dreilochbrenner,
5. der Argandbrenner, bestehend aus einem Specksteinring mit 20 bis 40 kleinen konzentrisch angeordneten kreisrunden Gasausströmungsöffnungen. Die Luft strömt nach Argandschem Prinzip von außen und innen zur Flamme; ein Zylinder befördert die Luftzufuhr;
6. der Dumasbrenner, welcher sich von dem Argandbrenner dadurch unterscheidet, daß die vielen kreisrunden Gasausströmungsöffnungen durch einen einzigen kreisrunden Schnitt ersetzt sind;
7. der Sonnenbrenner, mit einer Anzahl von Zweiloch- und Schnittbrennern;
8. der von Friedrich Siemens 1879 konstruierte und 1881 wesentlich vervollkommnete Regenerativgasbrenner, bei welchem die

Verbrennungsluft, bevor sie zur Flamme tritt, durch die hohe Temperatur der Verbrennungsprodukte vorgewärmt wird. Von den nach demselben und ähnlichem Prinzip gebauten Lampen sei die Wenhamlampe aufgeführt. Schon 1819 versuchte man, jedoch vergeblich, dem Brenner vorgewärmte Luft zuzuführen.

Die mit Leuchtgas gespeisten Schnitt-, Loch- und Argandbrenner müssen relativ große Ausströmungsöffnungen haben, und das Gas muß unter kleinem Druck ausströmen, weil sonst zu viel Luft mitgerissen und die Flamme dadurch entleuchtet wird. Umgekehrt müssen die Acetylenbrenner wegen des hohen Reichtums des Gases an Kohlenstoff enge Ausströmungsöffnungen besitzen und mit hohem Druck brennen.

Glühlicht. 1826 stellte Drummond das nach ihm benannte Kalklicht her. 1867 erfand Tessié de Motay das Zirkonlicht, 1884 Fahnejhelm den Magnesiakamm. Den größten Erfolg errang Auer v. Welsbach 1892 mit dem von ihm schon 1885 erfundenen und dann wesentlich verbesserten Gasglühlicht, das die vorher genannten Leuchtgasbrenner jetzt fast vollständig verdrängt hat. Statt Leuchtgas verwendet man für Glühlicht auch Petroleum-, Spiritus-, Benzindämpfe, Acetylen und seit etwa fünf Jahren Aerogen- und Luftgas, das durch Karburieren der Luft mit den Dämpfen gewisser flüchtiger Kohlenwasserstoffe, wie Gasolin, Solin gewonnen wird.

c) Elektrisches Glühlicht[1]).

Schon 1838 schlug der Belgier Jobard vor, einen Kohlenstab in einem luftleeren Raume elektrisch zu glühen. Die Versuche, diesen Vorschlag praktisch auszuführen, blieben lange ohne wesentlichen Erfolg. Eine neue Periode der Entwickelung beginnt erst im Jahre 1878, als von Sawyer und Man Glühfäden aus Papier und Faserstoff, von Swan solche aus Baumwolle hergestellt wurden. Maxim erfand 1879 das Präparieren des Fadens, indem er die mit einem Papierfaden versehene Lampe zuerst mit Kohlenwasserstoffen füllte und sie durch den elektrischen Strom zum Glühen brachte, wodurch sich auf dem Faden Kohle in Form von grauglänzendem Graphit niederschlägt. 1879 gelang es Edison, eine brauchbare elektrische Lampe dadurch zu konstruieren, daß er Kohlenfäden aus Bambusrohr herstellte. Die elektrische Lampe wurde seit der Pariser elektrischen Ausstellung von 1881 allgemeiner bekannt und hat dann schnell ihren Siegeslauf durch die Welt genommen.

Die Lampen wurden zuerst für 65 Volt, dann für 110 Volt gebaut; heute ist man, hauptsächlich zur Entlastung der Betriebskabel, fast allgemein zu 220 Volt übergegangen. Die Fäden müssen im letzteren

[1]) Ausführlicheres siehe J. f. G. u. W. **44**, 323 (1901).

Falle, falls man nicht zwei hintereinanderschalten will, viel dünner gemacht werden, was erst durch Einführung der Zellulose gelang.

Seit 1898 sind zu den Kohlenfadenlampen die Elektrolytlampe von Nernst (Nernstlampe) und die Osmiumlampe von Auer v. Welsbach und ganz kürzlich die Tantallampe von Siemens und Halske[1]) sowie die Zirkonlampe[2]) hinzugetreten.

d) Das elektrische Bogenlicht.

Der elektrische Lichtbogen ward zu Anfang des vorigen Jahrhunderts wahrscheinlich von Davy entdeckt. Sicher ist, daß Davy 1808 unter Benutzung von 2000 Volta-Elementen ausgedehnte Versuche mit Bogenlicht angestellt hat.

Da die Kohlen allmählich abbrennen, so vergrößert sich ihr Abstand und damit der Widerstand der Luft, und es würde, wenn die Kohlen feststehen, der Strom diesen Widerstand nicht mehr überwinden können, so daß das elektrische Licht schließlich erlöschen würde. Man benutzt daher jetzt in der Technik Vorrichtungen, welche die Kohlen immer in nahezu gleichem Abstand voneinander halten. Anfangs konstruierte man sogenannte Hauptstromlampen, welche in dem die Lampe speisenden Strome (Hauptstrom) einen die elektrische Regulierung besorgenden Elektromagneten besaßen. Sie regulieren auf konstante Stromstärke; sie sind darum nur für Einzelbetrieb brauchbar, eignen sich also nicht zur Teilung des Lichtes; sobald man nämlich mehrere hintereinander in denselben Stromkreis einschaltet, stören sie sich gegenseitig. Von den älteren Hauptstromlampen seien die von Foucault-Dubosq, Serrin und die weit einfachere Kontaktlampe von v. Hefner-Alteneck erwähnt.

Bei den 1878 fast gleichzeitig von Lontin, Mersenne und Fontaine konstruierten Nebenschlußlampen befindet sich der Elektromagnet im Nebenschluß. Diese Lampen regulieren auf konstante Spannung. Aber auch hier stören sich die hintereinandergeschalteten Lampen noch etwas.

Eine vollkommene Unabhängigkeit vieler in einem Stromkreise hintereinandergeschalteter Lampen wurde 1878 durch die auf konstanten Widerstand regulierende Differentiallampe von v. Hefner-Alteneck erreicht, welche sowohl im Hauptstrome als auch im Nebenschluß je einen Elektromagneten enthält.

In einzelnen Fällen wird die Regulierung durch magnetische Klemmung (Gülcher) oder mittels eines kleinen Elektromotors besorgt. Die 1876 von Jablochkoff konstruierte elektrische Kerze besteht aus zwei nebeneinandergestellten dünnen Kohlenstiften und einer Zwischenschicht aus Kaolin, welche erst bei hoher Temperatur

---

[1]) J. f. G. u. W. 48, 161 (1905).
[2]) Vgl. Wedding, E. T. Z. 26, 83 (1905).

leitend wird. Da die Lampe mit Wechselstrom betrieben wird, brennen die Kohlen gleichmäßig herunter, so daß eine Regulierungsvorrichtung nicht nötig ist. Diese Lampe, welche als der Vorläufer der Nernstlampe anzusehen ist, hat sich wegen unruhigen Brennens und häufigen Versagens nicht bewährt.

Als Elektrodenmaterial benutzte Davy besonders geglühte Holzkohle. Da diese aber sehr schnell verbrennt, empfahl Foucault 1843 die Verwendung der langsamer verbrennenden Retortenkohle. Die letztere wurde sodann durch die weit gleichmäßigere Homogenkohle ersetzt, welche aus einem Gemisch von Graphit, Ruß und Teer unter Luftabschluß hergestellt wird. 1877 wurden von Gebrüder Siemens die sogenannten Dochtkohlen eingeführt, welche in der Mitte mit einem im wesentlichen aus Graphit und Wasserglas bestehenden Kern oder Docht versehen sind und hauptsächlich zur Beruhigung und Fixierung des Lichtbogens dienen.

Die 1894 fast gleichzeitig von Marks und Jandus eingeführten Bogenlampen mit eingeschlossenem Lichtbogen brennen unruhiger und sind unökonomischer als die gewöhnlichen Bogenlampen mit offenem Lichtbogen; ihr Hauptvorzug ist ihr geringer Verbrauch an Kohlen. Auch die 1897 von Hegener eingeführten Voltalampen für Spannungen von 30 bis 35 Volt, von denen sich bei einer Netzspannung von 110 Volt drei mit geringem Spannungsverlust im Vorschaltwiderstand hintereinanderschalten lassen, bieten keinen wesentlichen Vorzug. Einen bemerkenswerten Fortschritt bezeichnen die seit 1900 von Bremer eingeführten Flammenbogenlampen (Bremerlicht). Allerdings ist die Bremersche Idee nicht neu; denn schon Casselmann hatte 1843 gefunden, daß sich die Lichtstärke durch Imprägnieren der Kohlen mit Metallsalzen erhöhen läßt. Ebenso hatten sich vor Bremer auch schon andere, z. B. Carré und Gaudoin, wenn auch erfolglos, mit dieser Angelegenheit beschäftigt. Dem Bremerlicht sind die Effektbogenlampen von Siemens und Halske, die Lampen von Weinert, Edelmann und Wallin, Körting und Matthiesen und anderen Firmen gefolgt. Schon 1899 hatte Rasch seine auf ähnlichem Prinzip beruhende Elektrolytbogenlampe zum Patent angemeldet.

Die von Arons 1892 erfundene Quecksilberbogenlampe ist von Hewitt und von Heräus praktischen Beleuchtungszwecken angepaßt worden. Heräus verwendet hierbei Quarzhüllen, wodurch auch die ultravioletten Strahlen nutzbar gemacht werden.

§ 7. Undulationstheorie.

Nach der von Huygens[1]) begründeten *elastischen Theorie* versetzt jeder leuchtende oder, allgemeiner ausgedrückt, jeder strahlende Punkt, welchen wir uns als in sehr raschen Schwingungen begriffen zu denken

[1]) Christian Huygens, Traité de la lumière. Leide 1690.

haben, einen hypothetischen Stoff, den sogenannten Äther, in einen periodischen Schwingungszustand.

Die zentrale Erschütterung breitet sich in Gestalt gewisser Flächen aus, welche Wellenflächen genannt werden. In einem homogenen Medium geben die Verbindungslinien des strahlenden Punktes und der Punkte dieser Oberflächen (die Radienvektoren nach diesen Oberflächen) die Richtungen an, längs denen die Erschütterung in ihrem Charakter dieselbe bleibt, längs denen, wie man daher sagt, die Erschütterung sich fortpflanzt. Die Länge der Radienvektoren nach den Punkten einer dieser Wellenflächen gibt ein Maß für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den zugehörigen Richtungen. Diese Radienvektoren sind die *Strahlenrichtungen*. In einem homogenen isotropen (einfach brechenden) Mittel sind die Wellenflächen Kugeln; es ist also die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nach allen Richtungen die gleiche, und die Strahlen sind die zur Wellenfläche senkrechten Kugelradien. Jedes Ätherteilchen schwingt transversal, d. h. in der Wellenfläche senkrecht zur Strahlenrichtung. Beim Schall erfolgen die Schwingungen der Luft bekanntlich longitudinal, d. h. in der Fortpflanzungsrichtung. Beim geradlinig polarisierten Strahl erfolgen die Schwingungen sämtlicher Ätherteile in ein und derselben Ebene; den Abstand zweier aufeinander folgenden Ätherteilchen, welche sich in demselben Schwingungszustande (derselben Phase) befinden, nennt man Wellenlänge. Beim natürlichen Strahl erfolgen die Schwingungen jedes Ätherteilchens nacheinander in allen auf dem Strahl senkrechten Richtungen.

Nach der neueren von Maxwell[1]) begründeten *elektromagnetischen Lichttheorie* haben wir es mit transversalen, sich gegenseitig bedingenden, aufeinander senkrecht stehenden elektrischen und magnetischen Schwingungen zu tun. Beim geradlinig polarisierten Strahl erfolgen die elektrischen Schwingungen sämtlicher Schwingungselemente in einer Ebene, die magnetischen Schwingungen in der dazu senkrechten Ebene. In den Beobachtungen von Hertz fand die elektromagnetische Theorie eine mächtige experimentelle Stütze. Die elastische Theorie mag, was den Vorgang der Schwingung selbst betrifft, anschaulicher sein, da sie an die sinnlich greifbare Materie oder doch an etwas wesentlich Analoges anknüpft. Die elektromagnetische Theorie knüpft an das noch immer unbekannte Etwas an, was die Elektrizität ist. Aber das darf den Ausschlag nicht geben. Ein Zweifel über die elektromagnetische Natur des Lichtes sollte heute nicht mehr bestehen.

---

[1]) Cl. Maxwell, A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. Philos. Transact 155, 459 (1865) und A Treatise on Electricity and Magnetism., Part. IV, Cap. 20. Oxford 1873. (Deutsche Übersetzung von B. Weinstein.)

Schwingungsdauer, Schwingungszahl. Wellenlänge.

Jeder Strahlenart entspricht ein bestimmter Wert der Schwingungsdauer $\mathfrak{T}$ und der Schwingungszahl N und für ein gegebenes homogenes isotropes Medium eine bestimmte Wellenlänge λ. Die Wellenlänge λ wird mittels Interferenzerscheinungen gemessen.

Glühende feste und flüssige Körper senden, wie ihr zusammenhängendes Spektrum zeigt, eine unendliche Anzahl von Wellenzügen von allen stetig ineinander übergehenden Graden der Wellenlängen aus. Von diesen vermögen jedoch nur diejenigen Wellen, deren Längen zwischen gewissen Grenzen liegen, nämlich die sogenannten sichtbaren Wellen (Strahlen) die Netzhaut zu erregen. Durch den Reiz wird im Gehirn außer einer Lichtempfindung je nach der Wellenlänge eine verschiedene Farbenempfindung hervorgebracht. Der physiologische Vorgang des Sehens ist also in gewisser Beziehung dem des Hörens analog. Farben und Töne sind einander entsprechende physiologische Wahrnehmungen. Die ultraroten Strahlen haben größere, die ultravioletten Strahlen kleinere Wellenlängen als die sichtbaren Strahlen.

In nachstehender Tabelle sind einige Strahlenarten ihrer Wellenlänge und Schwingungsart nach geordnet aufgeführt.

Wellenlänge im luftleeren Raume in milliontel Millimeter ($\mu\mu$ [1])	Schwingungszahl in der Sekunde in Billionen	Charakter	
61 000	4,9	Längste Welle nach Rubens u. Aschkinass (§ 11)	Ultrarotes Spektrum
812	369	Längste ausnahmsweise sichtbare Welle nach Helmholtz (S. 2)	
760	395	Äußerstes Rot	Sichtbares Spektrum
683	437	Rot	
615	485	Orange	
559	534	Gelb	
512	582	Grün	
473	631	Blaugrün (Cyan)	
439	679	Blau	
410	728	Violett	
360	833	Äußerstes Violett	Ultraviolettes Spektrum
330	909	Kürzeste sichtbare Welle nach Soret	
210	1429	Kürzeste von einem Menschenauge gesehene Welle nach Mascart	

[1]) 1 μ = 0,001 mm; 1 $\mu\mu$ = 0,000 001 mm.

Mittlere Energie in der Volumeneinheit.

Es sei (Fig. 1) ein Punkt L gegeben, welcher ein homogenes, geradlinig polarisiertes Strahlenbündel von der Wellenlänge λ und der Schwingungsdauer $\mathfrak{T}$ aussendet. Wir wollen nun einen in der Strahlenrichtung liegenden, um x von L entfernten Punkt O betrachten und die mittlere Energie P der am Orte von O befindlich gedachten Volumeneinheit bestimmen.

Fig. 1.

L ——— x ——— O

a) Elastische Theorie. Bezeichnet v das Volumen des am Orte O befindlichen Ätherteilchens, βv seine Masse, z seine Verschiebung aus der Gleichgewichtslage zur Zeit $\mathfrak{t}$; $\mathfrak{a}$ die größte Verschiebung (Schwingungsweite oder *Amplitude*), so gilt die Relation

$$z = \mathfrak{a} \sin 2\pi\left(\frac{\mathfrak{t}}{\mathfrak{T}} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad \ldots \ldots \quad 1)$$

und es ist

$$P = 2\beta\left(\frac{\pi\mathfrak{a}}{\mathfrak{T}}\right)^2 \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

Beweis von Gleichung 2). Die Energie des schwingenden Äthers setzt sich ebenso wie die jedes bewegten Körpers aus kinetischer (lebendiger Kraft) und potentieller (Energie der Lage) zusammen. Diese beiden Anteile sind sowohl bei einer transversalen wie bei einer longitudinalen fortschreitenden, elastischen Welle[1]) in jedem Augenblick einander gleich. Mithin ist die Energie eines Volumenelementes zu einer bestimmten Zeit gleich dem doppelten Werte der lebendigen Kraft, d. h. gleich der Masse des Elementes multipliziert mit dem Quadrate der augenblicklichen Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit c des Elementes v zur Zeit $\mathfrak{t}$ ist

$$c = \frac{dz}{dt} = \frac{2\pi\mathfrak{a}}{\mathfrak{T}} \cdot \cos 2\pi\left(\frac{\mathfrak{t}}{\mathfrak{T}} - \frac{x}{\lambda}\right),$$

demnach die Energie von v zur Zeit $\mathfrak{t}$ gleich

$$c^2 \cdot \beta \cdot v = \left(\frac{2\pi\mathfrak{a}}{\mathfrak{T}}\right)^2 \cdot \beta \cos^2 2\pi\left(\frac{\mathfrak{t}}{\mathfrak{T}} - \frac{x}{\lambda}\right) \cdot v.$$

Mithin ist der Mittelwert der Energie während einer Schwingungsdauer

$$\beta v \cdot \frac{1}{\mathfrak{T}} \int_{\mathfrak{t}}^{\mathfrak{t}+\mathfrak{T}} c^2 \cdot dt = \frac{1}{2}\left(\frac{2\pi\mathfrak{a}}{\mathfrak{T}}\right)^2 \beta \cdot v,$$

woraus durch Division mit v Gleichung 2) hervorgeht.

b) Nach der elektromagnetischen Theorie ist

$$P = 2\pi \cdot \frac{\mathfrak{a}^2}{\gamma} \quad \ldots \ldots \quad 3)$$

wenn $\mathfrak{a}$ wieder die Amplitude der elektrischen und magnetischen Schwingung und γ die sogenannte Dielektrizitätskonstante bezeichnet.

---

[1]) Rayleigh, Theory of sound, § 245.

Beweis zu Gleichung 3). Die Energie eines Schwingungselementes v setzt sich aus elektrischer und magnetischer zusammen. Für eine fortschreitende Welle sind diese Anteile wieder einander gleich, und zwar gleich

$$2\pi \cdot \frac{z^2}{\gamma} v,$$

wenn z die elektrische Verschiebung zur Zeit t bezeichnet. Da für z wieder Gleichung 1) besteht, so können wir für den letzteren Ausdruck auch schreiben

$$4\pi \cdot \frac{a^2}{\gamma} \sin^2 2\pi \left(\frac{t}{\mathfrak{T}} - \frac{x}{\lambda}\right) \cdot v,$$

woraus sich durch Integration Geichung 3) ergibt.

Nach beiden Theorien ist also der Mittelwert P dem Quadrate der Amplitude a *proportional. Wächst also* a *auf das Doppelte, so wächst P auf das Vierfache.*

Energiestrom, Bestrahlung.

Nach beiden Theorien gibt jedes Schwingungselement seine Energie an die nächstfolgenden auf demselben Strahle liegenden Elemente ab; die Strahlen bilden also die Bahnen, längs welcher die Energie wandert.

Die Energie, welche von irgend einer Strahlungsquelle während der Zeiteinheit durch eine beliebige Fläche hindurchgeschickt wird, wird Strahlungsenergie, Energiemenge, Strahlungsmenge, Strahlung oder *Energiestrom* genannt. Wir wollen im folgenden die letztere Bezeichnung gebrauchen. Demnach ist das (den Sehnerven *reizende* objektive) Licht, physikalisch gedeutet, der Energiestrom der Lichtstrahlen (der sichtbare Energiestrom); hierfür werden wir zuweilen (z. B. § 93) auch Lichtmenge sagen. Die Bezeichnung „Energiestrom" werde deshalb gewählt, weil diese Größe der schon auf S. 1 erwähnten, mit „Lichtstrom" bezeichneten Größe entspricht.

Im nachstehenden sollen auf Energieströme bezügliche Untersuchungen als *energetische*, auf Lichtströme bezügliche als *photometrische* bezeichnet werden.

Fällt von irgend einer Strahlungsquelle auf ein Flächenelement s der Energiestrom G, so wollen wir die Größe

$$B = \frac{G}{s} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 4)$$

die auf s erzeugte *Bestrahlung* (Bestrahlungsstärke) nennen. B bezeichnet also den Energiestrom, welchen die am Orte s befindlich gedachte Flächeneinheit von der Strahlungsquelle empfängt.

Intensität der Wellenbewegung in einem Punkte O.

Man versteht hierunter entweder:

1. den Mittelwert P der Energie der Wellenbewegung der in O gedachten Volumeneinheit, oder

2. nur den Mittelwert der lebendigen Kraft bzw. elektrischen Energie, also die Größe 0,5 P, oder

3. den Energiestrom, welcher die in O befindlich gedachte Flächeneinheit senkrecht durchsetzt; diese Größe ist, wie wir § 12 sehen werden, die maximale Bestrahlung eines durch den Punkt O gehenden Flächenelementes.

Ist die Strahlungsquelle ein Punkt, welcher homogene, geradlinig polarisierte Strahlen aussendet, so ist der Energiestrom, welcher von ihm auf ein Flächenelement s auffällt, proportional dem Quadrate der Amplitude der an s anliegenden Schwingungselemente. Ebenso ist dann die Intensität nach allen drei Festsetzungen proportional dem Quadrate der Amplitude des am Orte O befindlichen Schwingungselementes. Aus diesem Grunde definiert Kirchhoff die Intensität einfach als das Quadrat dieser Amplitude.

Zweites Kapitel.

Energetische Grundlagen.

A. Teilung eines Energiestromes beim Auftreffen auf einen beliebigen Körper.

§ 8. Reflexions-, Durchlässigkeits- und Absorptionsvermögen.

Es sei I ein homogenes Medium und II ein in dasselbe eingebettetes beliebiges Medium. So lange sich Strahlen in I bewegen, geschieht es geradlinig. Sobald aber die Strahlen, welche wir als ein sehr schmales, paralleles und *homogenes* Bündel annehmen wollen, auf II auftreffen, spalten sie sich in zwei Teile:

a) Der eine Teil wird gleich an der vorderen Grenzfläche von II (Vorderseite) nach dem bekannten Gesetz (Reflexionswinkel und Einfallswinkel liegen in derselben Ebene und sind einander gleich) in einer bestimmten Richtung, d. h. *regelmäßig reflektiert;* ein anderer Teil wird nach allen oder nach vielen Seiten zerstreut, d. h. *diffus reflektiert*, gerade so, als ob die Vorderseite selbst strahlte.

b) Der Rest [1]) dringt in den Körper ein, wobei er im allgemeinen

[1]) Streng genommen tritt diese Trennung nicht an der Oberfläche, sondern in einer unendlich dünnen oder doch sehr dünnen Oberflächenschicht, ev. unter entsprechenden Absorptionserscheinungen ein.

von seiner Richtung abgelenkt, d. h. *gebrochen* wird. Dieser eindringende Teil kann nun verschiedene Veränderungen erfahren.

α) Ein Teil wird aus dem Innern von II heraus reflektiert und bildet mit dem von der Vorderfläche reflektierten Energiestrom den gesamten reflektierten Energiestrom.

β) Ein Teil tritt aus der Rückseite von II aus, durchsetzt also den Körper. Von diesen Strahlen kann ein Teil in bestimmten Richtungen austreten; wir wollen dann sagen: die Strahlen sind *regelmäßig durchgelassen*. Ein anderer Teil kann nach allen oder vielen Richtungen austreten; wir wollen dann, gleichviel ob die Zerstreuung an der Vorder- oder Rückfläche oder im Innern oder an zwei dieser Stellen oder allen drei erfolgt, sagen: die Strahlen sind *diffus durchgelassen*.

γ) Der Rest wird vom Körper *absorbiert* (verschluckt) und je nach der Beschaffenheit des Körpers II in andere Energieformen (z. B. Wärme, chemische Energie) verwandelt. Durch diese Absorption und Umwandlung entstehen die verschiedenen, bereits teilweise erwähnten Wirkungen (§ 3), z. B. die Lichtwirkung durch die von der Netzhaut des Auges ausgeübte Absorption. Im folgenden wollen wir voraussetzen, daß durch Absorption nur Wärme entsteht.

Zusammenfassung:

Der in einer bestimmten Richtung auf den Körper II auffallende Energiestrom wird teils regelmäßig, teils diffus reflektiert, teils absorbiert, teils regelmäßig, teils diffus durchgelassen.

Definitionen:

Wir wollen nun nennen

1. das Verhältnis des gesamten regelmäßig reflektierten Energiestromes zum auffallenden: das regelmäßige Reflexionsvermögen oder kurz *Reflexionsvermögen* des Körpers. Dasselbe soll im folgenden stets mit R bezeichnet werden;

2. das Verhältnis des gesamten diffus reflektierten Energiestromes zum auffallenden: das *diffuse Reflexionsvermögen* (Bezeichnung M);

3. das Verhältnis des gesamten absorbierten Energiestromes zum auffallenden: das *Absorptionsvermögen* (Bezeichnung A);

4. das Verhältnis des gesamten regelmäßig hindurchgelassenen Energiestromes zum auffallenden: das regelmäßige Durchlässigkeitsvermögen oder kurz *Durchlässigkeitsvermögen* (Bezeichnung D);

5. das Verhältnis des gesamten diffus durchgelassenen Energiestromes zum auffallenden: das *diffuse Durchlässigkeitsvermögen* (Bezeichnung T).

Diese Größen haben für eine bestimmte Wellenlänge und für einen bestimmten Einfallswinkel, unter welchem die Strahlen auf II auffallen, einen bestimmten Wert; sie ändern sich im allgemeinen mit der Wellenlänge und dem Einfallswinkel.

Nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie ist stets

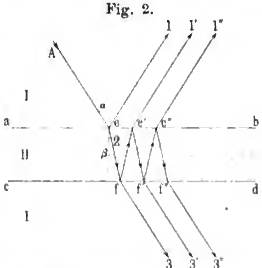
$$R + M + A + D + T = 1.$$

Die Vorgänge bei der Teilung des auf II fallenden Energiestromes sind im allgemeinen sehr verwickelt. Außer der Beschaffenheit der Grenzflächen, ob dieselben glatt (poliert) oder rauh sind, kommt auch noch die Natur der beiden Medien in Betracht, z. B. ob auch II homogen ist, oder ob es in homogener Masse Teilchen von anderer optischer Beschaffenheit enthält, d. h. *trübe* ist, oder ob es überhaupt an keiner Stelle homogen ist.

Der einfachste Fall, welcher hier als Beispiel dienen möge, ist folgender (Fig. 2).

c) II ist homogen und auch noch in hinreichend dicken Schichten für alle oder einzelne Strahlen durchlässig; ein Körper, welcher diesen Bedingungen für die Lichtstrahlen entspricht, werde „*klar*" genannt.

Fig. 2.



d) Die Grenzflächen von II sind vollkommen glatt, d. h. alle Oberflächenteilchen liegen in einer mathematisch regelmäßigen Fläche; in optischem Sinne glatt sind auch noch die Flächen, bei denen die Abweichungen von der eben genannten mathematischen Fläche, d. h. die Erhöhungen und Vertiefungen oder kurz die Rauheiten wesentlich kleiner als die Längen der Lichtwellen sind.

e) Die Grenzflächen sind eben und einander parallel, so daß also II eine planparallele Schicht bildet.

Alsdann werden die in Richtung A bei e auf die Vorderfläche ab auffallenden Strahlen teils nach Richtung 1 regelmäßig reflektiert, teils — falls der Körper einfach brechend ist — nach Richtung 2 regelmäßig gebrochen. Die Brechung erfolgt gemäß dem Snelliusschen Gesetz:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n,$$

wo α den Einfallswinkel, β den Brechungswinkel und n den Brechungsexponenten des zweiten Mittels gegen das erste bedeutet.

Bezeichnet ferner

c, c_1, c_2 die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung im leeren Raume, bzw. im Mittel I und II,

n_1, n_2 den absoluten Brechungsexponenten des Mittels I bzw. II,

so ist

$$n_1 = \frac{c}{c_1}; \; n_2 = \frac{c}{c_2}; \; n = \frac{n_2}{n_1}.$$

Die Strahlen 2 gehen bis zum Punkte f der Rückseite cd weiter; sie werden hier teils regelmäßig gebrochen, d. h. sie treten parallel zu A in der Richtung 3 durch cd wieder nach I hinein aus; teils werden sie an cd regelmäßig in der Richtung fe' reflektiert. Die Strahlen fe' erleiden an ab eine regelmäßige Reflexion nach $e'f'$ und eine regelmäßige Brechung nach der zu 1 parallelen Richtung 1'. Die in Richtung $e'f'$ gehenden Strahlen werden an cd, dann wieder an ab usf. regelmäßig reflektiert. Mit jeder Reflexion ist eine Brechung verbunden. Mithin geht von der Vorderseite das parallele Bündel 1, 1', 1''..., von der Rückseite das parallele Bündel 3, 3', 3'' nach I hinein.

f) Das durch die Bedingungen c) und d) definierte Medium II soll nicht von ebenen, sondern gekrümmten Flächen, z. B. von Kugelflächen wie bei Linsen, begrenzt sein. Alsdann sind die direkt, d. h. gleich an der vorderen Grenzfläche reflektierten Strahlen 1 nicht mit den aus II herausreflektierten 1', 1''... parallel; ebenso sind die durchgelassenen Strahlen 3, 3', 3''... nicht untereinander parallel. Für gewöhnlich kommen nur die direkt durchgelassenen Strahlen 3 in Betracht; es sind dies z. B. bei Linsen diejenigen Strahlen, welche zur Bilderzeugung beitragen.

Ein klares Mittel läßt bei geeigneter Form der Oberfläche (z. B. als planparallele Platte oder als Linse) die Gestalt der dahinter befindlichen Gegenstände scharf erkennen und werde dann mehr oder weniger *durchsichtig* genannt. Im gewöhnlichen Sprachgebrauch wird so allerdings jeder Körper genannt, welcher nicht undurchsichtig ist.

Außer den vorher unter 1. bis 5. definierten Vermögen kommen für manche Zwecke bei durchsichtigen Körpern noch die folgenden Größen in Betracht:

6. Das Verhältnis des direkt an der Vorderfläche regelmäßig reflektierten Energiestromes zum auffallenden Energiestrom, das sogenannte Oberflächen-Reflexionsvermögen.

7. Das Verhältnis des direkt durchgegangenen Energiestromes zum auffallenden Energiestrome, welches wir als Durchlässigkeitsvermögen für die direkt durchgegangenen Strahlen bezeichnen wollen.

Beispiel. Auf eine vollständig durchsichtige planparallele Glasplatte falle aus Luft homogenes Licht senkrecht auf; und es sei

$$\text{das Oberflächen-Reflexionsvermögen } R' = 0{,}04,$$

d. h. es werden 4 Proz. direkt an der Vorderfläche reflektiert, während 96 Proz. eindringen. Von den letzteren werden wieder 96 Proz. an der Rückseite durchgelassen. Das Durchlässigkeitsvermögen für die direkt durchgegangenen Strahlen ist also

$$D' = 0{,}96 \cdot 0{,}96 = 0{,}9216.$$

Alsdann ist (vgl. Anhang 3)

$$R = 0{,}077;\ D = 0{,}923,$$

während $M = T = A = 0$ ist.

D' und D sind also hier praktisch einander gleich zu setzen.

Verallgemeinerung der Definitionen. Die obigen Definitionen 1 bis 7 wurden zunächst für *homogene* Strahlung aufgestellt. In diesem Falle erhält man für die definierten Größen dieselben Werte, gleichviel ob man sie z. B. mittels eines der in § 11 angegebenen objektiven Energiemesser (energetische Methode, vgl. z. B. § 120) oder, falls die Strahlung eine sichtbare ist, mittels des Auges unter Benutzung irgend eines Photometers (photometrische Methode, vgl. z. B. § 119 und 120) bestimmt.

Sollen die Definitionen auf eine *gemischte* Strahlung — und mit solcher, nämlich mit weißem Lichte, haben wir es in der Photometrie meistens zu tun — ausgedehnt werden, so dürfen die Größen nur *energetisch* bestimmt werden. Die photometrische Methode liefert nämlich in diesem Falle im allgemeinen (ausgenommen z. B. bei vollständig grauen Körpern) andere Werte, und zwar solche, welche ungefähr mit den Zahlen übereinstimmen, die man nach einer energetischen Methode für die am stärksten auf das Auge wirkenden Strahlen erhält. Wir wollen zur Unterscheidung die energetisch gefundenen Werte als energetisches Vermögen (Reflexionsvermögen usw.) oder als *Vermögen für gemischten Energiestrom* und die photometrisch gefundenen Werte als photometrisches Vermögen oder *Vermögen für gemischten Lichtstrom* bezeichnen.

Demnach ist (vgl. § 27) beispielsweise

> *das photometrische Reflexionsvermögen gleich dem Verhältnis aus dem reflektierten und dem auffallenden Lichtstrom.*

In diesem Kapitel soll, falls nichts anderes ausgesagt wird, bei gemischter Strahlung stets das energetische Vermögen gemeint sein.

Bei gemischter Strahlung ändern sich die definierten Größen im allgemeinen mit der spektralen Zusammensetzung und dem Einfallswinkel.

§ 9. Reflexion.

Ein Körper reflektiert um so regelmäßiger, je glatter seine Oberfläche ist; er reflektiert um so mehr diffus, je rauher die Oberfläche ist. Bouguer führt die diffuse Reflexion auf die regelmäßige zurück, indem er annimmt, daß die Oberfläche eines diffus reflektierenden Körpers an jeder kleinsten Stelle aus einer großen Menge von sehr kleinen spiegelnden Flächen besteht, die unter allen möglichen Winkeln gegen die Oberfläche des Körpers geneigt sind. Nach der von Fourier

und Quincke[1]) aufgestellten, von Lommel (§ 31, c) weiter ausgebildeten Anschauung dringen die Strahlen bis zu einer gewissen Tiefe in das Innere des Körpers ein und werden von dort nach Absorption eines die spezifische Farbe des Körpers bedingenden Teiles in das ursprüngliche Medium zurückreflektiert. Offenbar spielt außer der Natur des diffus reflektierenden Körpers, z. B. ob derselbe aus pulver- oder körnerförmigen Teilen besteht oder Stellen mit geändertem Gefüge enthält, auch noch die Oberflächenbeschaffenheit eine Rolle. Die Oberfläche zerstreut reflektierender Körper nennt man gewöhnlich *matt*, ohne damit irgend eine Erklärung der diffusen Reflexion geben zu wollen. Eingehend diskutiert Seeliger[2]) die Hypothesen über diffuse Reflexion.

a) Regelmäßig reflektierende Körper.

Das Reflexionsvermögen von Metallen für die verschiedenen Wellenlängen läßt sich aus zwei optischen Konstanten, z. B. dem Hauptazimut und Haupteinfallswinkel, nach den sogenannten metalloptischen Formeln berechnen.

Tabelle I (Anhang) enthält das von Hagen und Rubens[3]) experimentell bestimmte Reflexionsvermögen einer Reihe von Metallen bei nahezu senkrechtem Einfall der Strahlen.

Das Reflexionsvermögen von durchsichtigen Körpern läßt sich aus dem Oberflächen-Reflexionsvermögen bestimmen; das letztere wird nach den Fresnelschen Formeln aus dem Brechungsexponenten berechnet (Anhang 3).

b) Diffus reflektierende Körper.

Einen Körper, der den ganzen auffallenden Energiestrom diffus reflektiert, nennen wir *weiß*. Einen Körper, der von Strahlen jeder Wellenlänge den gleichen Bruchteil reflektiert, nennen wir *grau*. Ein Körper, welcher Strahlen gewisser Wellenlängen stärker als die anderer Wellenlängen (selektiv oder auswählend) reflektiert, heißt *gefärbt*. Ein Körper heißt z. B. rot, wenn er von allen auffallenden Strahlen nur die roten reflektiert, dagegen alle übrigen absorbiert. Ein Körper, welcher keine Strahlung reflektiert, sondern alle absorbiert und in Wärme verwandelt, heißt nach Kirchhoff *schwarz*. Diese Definitionen gelten nicht nur für Lichtstrahlen, sondern ganz allgemein für alle drei Strahlengruppen.

Das diffuse Reflexionsvermögen M eines weißen Körpers ist demnach für alle Wellenlängen gleich 1; für einen grauen Körper ist M

---

[1]) Pogg. Ann. **119**, 368 (1863).
[2]) Münch. Ber. **18**, 201 (1888).
[3]) Z. f. Instrk. **19**, 293 (1899).

kleiner als 1 und für alle Wellenlängen gleich; für einen gefärbten Körper ändert sich M mit der Wellenlänge; für einen schwarzen Körper ist für alle Wellenlängen $M = 0$.

Lambert bezeichnet das diffuse Reflexionsvermögen für die Lichtstrahlen bei senkrechtem Einfall mit *Albedo*. Seeliger versteht darunter das Verhältnis aus dem nach allen Seiten reflektierten zu dem von allen Seiten auffallenden Lichte.

Tabelle II (Anhang) enthält die Werte der Albedos für eine Reihe von Körpern nach den von Zöllner[1]) und Sumpner[2]) mit weißem Licht angestellten photometrischen Messungen. Die mitgeteilten Zahlen bezeichnen also das diffuse Reflexionsvermögen für weißen Lichtstrom.

Es gibt in der Natur keine absolut weißen, ja nicht einmal absolut graue Körper; denn jeder Natürkörper reflektiert in mindestens einem Spektralbezirk selektiv. Nahezu graue Körper sind z. B. Gips, Papier, Überzüge mit Magnesia, Baryumsulfat. Die letzteren Substanzen werden vielfach für Photometerschirme benutzt.

Es gibt in der Natur auch keine vollkommen schwarzen Körper. Nahezu schwarze Körper sind *Lampenruß* und das nach den Vorschriften von Lummer und Kurlbaum hergestellte *Platinmohr*. Sie absorbieren die Strahlung eines schwarzen Körpers von 100° bis zu 95 bzw. 97 Proz. Diese Grenze wird bei einer Schichtdicke von 30 bzw. 200 mg auf das Quadratdecimeter erreicht. Über Herstellung schwarzer Körper s. § 16.

§ 10. Durchlässigkeit.

Körper, welche keine ultraroten Strahlen durchlassen, nennt man *wärmeundurchlässig* oder adiatherman; sonst mehr oder weniger wärmedurchlässig oder diatherman. Bei wärmeundurchlässigen Körpern sind das regelmäßige und diffuse Durchlässigkeitsvermögen D und T für ultrarote Strahlen gleich Null; bei wärmedurchlässigen Körpern ist wenigstens eine dieser beiden Größen von Null verschieden.

Ein Körper, welcher keine Lichtstrahlen durchläßt, heißt *undurchsichtig*; alsdann ist für Lichtstrahlen $D = T = 0$.

Ein Körper, welcher bei geeigneter Oberfläche (z. B. als planparallele Platte) die Form der dahinter liegenden Gegenstände scharf erkennen läßt, heißt, wie wir vorher bereits bemerkten, *durchsichtig;* alsdann ist für Licht T (nahezu) gleich Null. Schaltet man zwischen eine Lichtquelle und einen von ihr beleuchteten Schirm eine planparallele durchsichtige Substanz, so wird die auf dem Schirme erzeugte Beleuchtung, welche ohne Platte E betrug, (nahezu) auf $D \cdot E$ ge-

[1]) Photometrische Untersuchungen. Leipzig, Wilhelm Engelmann, 1865.
[2]) Phil. Mag. (5) 35, 81 (1893).

schwächt, wenn D das Durchlässigkeitsvermögen für den benutzten Lichtstrom bezeichnet (§ 93). Die Beleuchtung ändert sich nicht, wenn man die durchsichtige Substanz parallel in der Richtung der Strahlen verschiebt.

Ein Körper, welcher die Form dahinter liegender Gegenstände nicht mehr erkennen läßt, heißt *durchscheinend;* für ihn ist D gleich Null. Schaltet man eine planparallele Platte aus einer solchen Substanz zwischen Lichtquelle und Schirm, so ändert sich die Beleuchtung auf dem Schirm mit der Verschiebung der Platte, weil letztere gewissermaßen als Lichtquelle wirkt.

Ein *halbdurchsichtiger* Körper ist ein solcher, durch welchen man die Form der dahinter liegenden Gegenstände nur noch schwach erkennen kann; für ihn sind D und T merklich von Null verschieden.

Es gibt in der Natur keine vollkommen wärmeundurchlässigen und undurchsichtigen Körper. Selbst Metalle sind in sehr dünnen Schichten wärmedurchlässig und durchsichtig. Z. B. eine $80\,\mu\mu$ dicke Silberschicht läßt nach Hagen und Rubens[1]) bis zu 31,6 Proz. des auffallenden Energiestromes durch; es ist hier in maximo also $D = 0{,}316$; dieses Maximum wird bei einer Wellenlänge von $321\,\mu\mu$ erreicht.

Ebenso gibt es in der Natur keine vollkommen durchsichtigen Körper; denn jede feste oder flüssige klare Substanz absorbiert einen mehr oder minder großen Teil des Lichtes; ferner hat sie auch keine absolut glatte Oberfläche, so daß eine wenn auch kleine Menge des Lichtes nach allen Seiten zerstreut wird. Schließlich erscheint jede noch so klare Glasmasse weißlich trübe, sobald man sie scharf von der Sonne beschienen von dunklem Grunde betrachtet. Jede Glasmasse zertreut im Innern eine wenn auch verhältnismäßig geringe Menge des Lichtes.

Quarz, Steinsalz, Flußspat, Sylvin sind durchsichtig und noch für einen Teil der ultraroten Wellen, z. B. Flußspat und Sylvin für Wellenlängen von weniger als 8 bzw. $19\,\mu$ durchlässig.

Alaun, Wasser, Glas sind durchsichtig, aber nahezu wärmeundurchlässig; z. B. Wasser besitzt für Wellenlängen von mehr als $1\,\mu$, und Glas für Wellenlängen von mehr als $3\,\mu$ eine starke Absorption. Eine Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff ist wärmedurchlässig, aber undurchsichtig. Diese letzteren Körper werden vielfach benutzt, um die ultraroten Strahlen von den Lichtstrahlen zu trennen (s. § 18).

a) Durchsichtige Körper. Ein durchsichtiger Körper heißt *farblos oder weiß*, wenn er alle Strahlenarten nahezu und im gleichen Verhältnis durchläßt. Er heißt *gefärbt*, wenn er einzelne Strahlenarten stärker als andere durchläßt. Er heißt *grau*, wenn er alle Strahlenarten beträchtlich, aber in demselben Maße schwächt. Rauchgläser sind selbst im günstigsten Falle nur nahezu grau.

---

[1]) Ann. d. Phys. (4) 8, 432 (1902).

Das regelmäßige Durchlässigkeitsvermögen D ist also bei einem farblosen Körper für alle Wellenlängen dasselbe und nahezu gleich 1; es ändert sich bei einem gefärbten Körper mit der Wellenlänge und ist bei einem grauen Körper wesentlich von 1 verschieden, aber für alle Wellenlängen gleich. Streng genommen sind auch die für gewöhnlich als farblos bezeichneten Körper für verschiedene Wellenlängen verschieden durchlässig, da sie in hinreichend dicken Schichten farbig erscheinen.

Farbige Substanzen werden vielfach beim Vergleich verschieden gefärbter Lichtquellen zur Verminderung der Farbenungleichheit der Vergleichsfelder benutzt (§ 103). Rauchgläser dienen häufig zur meßbaren Schwächung des Lichtes (§ 93).

b) Durchscheinende Körper werden *weiß* oder *gefärbt* genannt, je nachdem sie Strahlen verschiedener Wellenlängen in gleichem oder verschiedenem Grade diffus durchlassen, je nachdem also T für alle Wellenlängen dasselbe ist oder sich mit der Wellenlänge ändert.

Durchscheinende Substanzen sind z. B. Milchglas, Opalglas, Albatrin, Papier von geringer Dicke.

T ist selbst bei trüben Medien, wie Milchglas usw., im allgemeinen verhältnismäßig klein, da mit jeder Reflexion an den trübenden Teilchen eine verhältnismäßig starke Absorption verbunden ist. In neuerer Zeit haben Schott und Genossen in Jena eine Glassorte hergestellt, welche als trübende Teilchen durchsichtige Stoffe enthält, die nur wenig absorbieren. Auch durchscheinende Substanzen, z. B. Milchglas, finden vielfach Verwendung für Photometerschirme (Weber, § 87). Milchgläser sind jedoch nicht vollkommen weiß, da sie die weniger brechbaren Strahlen besser durchlassen als die stärker brechbaren. In der Beleuchtungstechnik benutzt man Glocken aus durchscheinendem Material häufig zum Abschwächen einer zu großen Helligkeit (z. B. für Bogenlicht) und zur Erzielung einer gleichmäßigeren Lichtverteilung.

c) Halbdurchscheinende Körper. Die als durchscheinend bezeichneten Körper sind in geringer Dicke halbdurchscheinend. Halbdurchscheinend sind auch mattierte Glasplatten, welche man durch Behandeln mit Schmirgel, durch Ätzen mit Fluorwasserstoff oder mittels eines Sandstrahlgebläses erhält. Durch diesen Vorgang bilden sich auf der Oberfläche kleine Erhöhungen und Vertiefungen, welche die Strahlen mit geringem Verlust nach allen Seiten zerstreuen.

§ 11. Strahlungsmessung.

a) Meßprinzip.

Ein Körper zeigt nur die Energie derjenigen Wellen an, welche er absorbiert, nicht aber die Energie der von ihm durchgelassenen oder reflektierten Wellen, da diese keine Änderungen in ihm hervorbringen. Aus diesem Grunde sind vollkommene Spiegel zu Strahlungs-

messungen nicht geeignet. Ebenso geben die chemischen Wirkungen einer Strahlung, z. B. die Schwärzung der Silbersalze und die Menge der durch Vereinigung von Chlor und Wasserstoff erzeugten Salzsäure, kein Maß für den gesamten Energiestrom, weil diese Substanzen vorzugsweise die violetten und ultravioletten Strahlen absorbieren. Dagegen besitzen, wie bereits S. 21 bemerkt wurde, Lampenruß und Platinmohr die Eigenschaft, Strahlen aller Wellenlängen nahezu vollkommen zu absorbieren und in Wärme umzuwandeln.

Das *Prinzip der Strahlungsmessung* besteht dementsprechend darin, daß man den zu messenden Energiestrom auf empfindliche, mit Lampenruß oder Platinmohr überzogene Temperaturmesser fallen läßt und die durch die (geringe) Temperaturerhöhung erzeugte physikalische Änderung mißt.

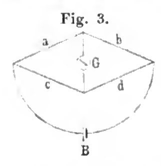
b) Empfindliche Temperaturmesser.

α) Die Thermosäule von Nobili. Wismut- und Antimonstäbe sind abwechselnd aneinandergelötet. Die auf der einen Seite liegenden Lötstellen werden geschwärzt und der Strahlung ausgesetzt; es entsteht dadurch ein Thermostrom. In den Stromkreis ist ein empfindliches Galvanometer eingeschaltet, dessen Ausschlag dem auffallenden Energiestrom proportional ist.

Diese Apparate haben eine zu große Masse und infolgedessen eine zu hohe Wärmekapazität. Rubens[1]) verwendet daher Säulen aus sehr feinen (0,1 mm dicken) Konstantan-Eisenelementen, bei welchen die bestrahlten Lötstellen sehr feine geschwärzte Silberscheibchen tragen.

β) Das Bolometer. Der Apparat, welcher zuerst von Svanberg[2]) konstruiert und später von Langley[3]) neu erfunden wurde, beruht auf der Erfahrung, daß der elektrische Widerstand eines dünnen Platin-, Eisen- und Nickel-Drahts oder -Blechstreifens mit der Temperatur wächst. Wesentlich verbessert wurde das Bolometer durch Lummer und Kurlbaum[4]) dadurch, daß es ihnen gelang, außerordentlich dünne (1 μ starke) Platinbleche herzustellen, deren kleine Masse eine fast momentane Temperaturerhöhung bewirkt.

Fig. 3.



Das Bolometer bildet den einen Zweig, z. B. *a* (Fig. 3), einer Wheatstoneschen Brücke. *B* liefert den konstanten Strom. Zunächst werden die Widerstände *a*, *b*, *c*, *d* so abgeglichen, daß die Brücke mit dem empfindlichen Galvanometer *G* stromlos wird; sodann wird das Bolometer der zu untersuchenden Strahlung ausgesetzt. Durch die Widerstandsänderung entsteht ein durch die Brücke gehender

[1]) Z. f. Instrk. 18, 65 (1898).
[2]) Pogg. Ann. 84, 411 (1851).
[3]) Sill. J. (3) 21, 187 (1881).
[4]) Wied. Ann. 46, 204 (1892).

Strom. Der beobachtete Ausschlag des Galvanometers ist wieder dem auffallenden Energiestrom proportional.

γ) Das Crookessche Radiometer in der von Nichols[1]) verbesserten Form, bestehend aus zwei zu beiden Seiten eines Quarzfadens symmetrisch befestigten geschwärzten Flügelchen, von denen eines bestrahlt wird. Der Ausschlag ist dem Energiestrom proportional.

c) Messungen in absolutem Maße.

Pouillet bestimmt mittels seines Pyrheliometers die Sonnenenergie kalorimetrisch durch diejenige Wärmemenge, welche eine in einem zylindrischen Gefäße eingeschlossene kleine Menge Wasser in der Zeiteinheit absorbiert, wenn die geschwärzte Grundfläche des Gefäßes von den Sonnenstrahlen senkrecht getroffen wird. Elektrische Glühlampen werden von Merritt direkt in ein Wasserkalorimeter gebracht, während Staub Geißlersche Röhren in ein Bunsensches Eiskalorimeter setzt (vgl. § 19). Auch mittels eines Luftthermometers kann man absolute Messungen vornehmen (Tumlirz, § 20).

Kurlbaum[2]) vergleicht die durch Strahlung erzeugte Wärmemenge mit derjenigen, welche ein elektrischer Strom in dem Bolometer hervorruft. Das Prinzip ist folgendes: Man bestrahlt den einen Zweig des Bolometers und mißt den Ausschlag e_0. Sodann schickt man bei verhinderter Zustrahlung durch diesen Zweig einen vom Brückenstrom unabhängigen elektrischen Heizstrom und ändert die Stromstärke so lange, bis sich wieder der Ausschlag e_0 ergibt. Ist i_0 die gefundene Stromstärke in Ampere und w der Widerstand des Bolometerzweiges in Ohm, so ist nach dem Jouleschen Satze die entwickelte Stromwärme[3])

$$i_0^2\, w \text{ Watt} = 10^7 \cdot i_0^2\, w \text{ Erg} = 0{,}239\, i_0^2\, w \text{ g-Kal.}$$

Diese Wärmemenge ist äquivalent dem auf den Bolometerzweig direkt gesandten Energiestrom. Ergibt sich nun bei einer zweiten direkten Bestrahlung der Ausschlag e, so wird demnach der Bolometerzweig getroffen von dem Energiestrom

$$0{,}239 \cdot i_0^2 \cdot w \cdot e/e_0 \text{ g-Kal.}$$

---

[1]) Z. f. Instrk. 17, 123 (1897).

[2]) Wied. Ann. 65, 746 (1898).

[3]) Im absoluten Maßsystem ist die Einheit der Länge das Centimeter, die Einheit der Masse das Gramm, die Einheit der Zeit die Sekunde. Die Einheit der Arbeit ist die Arbeit, welche geleistet wird, wenn 1 g an einem Orte, wo die Schwerbeschleunigung 1 cm (1 cm/sec²) betragen würde, um 1 cm gehoben wird; sie wird mit 1 Erg bezeichnet. Die Einheit der Wärmemenge ist die der Arbeitseinheit äquivalente Wärmemenge. Das 10^7fache des Erg ist gleich der technischen elektrischen Arbeitseinheit Wattsekunde. Ferner ist 1 Wattsek. = 0,239 g-Kal.$_{15}$, d. h. gleich dem 0,239fachen der Wärmemenge, welche die Masseneinheit Wasser (1 g) bei 15° (von 14,5 auf 15,5°) um 1° erwärmt; 1 g-Kal.$_{15}$ = 4,19 Wattsekunden.

In ähnlicher Weise wie Kurlbaum verfährt Ångström[1]) bei seinem Kompensations-Pyrheliometer: Von zwei dünnen, ganz ähnlichen, einseitig geschwärzten Platinstreifen wird der eine der zu messenden Strahlung ausgesetzt, der andere wird durch einen elektrischen Strom so lange erwärmt, bis die Erwärmung der beiden Streifen die gleiche ist.

d) Messungen im Spektrum.

Man bedient sich hierbei sehr schmaler (linearer) Thermosäulen und Bolometer.

Das ultraviolette Spektrum wird mittels Quarz- oder Flußspatprismen, das sichtbare Spektrum meist mittels Glasprismen, das ultrarote Spektrum mittels Prismen aus Steinsalz, Flußspat (bis 8 μ) oder Sylvin (bis 18 μ) erzeugt. In allen Fällen kann man sich auch eines Beugungsgitters bedienen. Noch größere Wellenlängen[2]) als 18 μ erhält man, wenn man die Strahlen mehrfach (vier- bis sechsmal) an Körpern reflektieren läßt, die auswählend reflektieren; man erhält dann diejenigen Strahlen *(Reststrahlen)*, welche von der betreffenden Substanz metallisch reflektiert werden. Das Gebiet metallischer Absorption liegt für Flußspat bei 24,4 μ, für Steinsalz bei 51 μ, für Sylvin bei 61 μ.

Die mittels Prismas direkt gefundenen Ausschläge sind von den individuellen Eigenschaften des benutzten Prismas abhängig. Um sich von diesem Einfluß zu befreien, hat man die Werte auf das „Normalspektrum" zu reduzieren, d. h. man hat durch eine Umrechnung diejenigen Zahlen zu ermitteln, die man erhalten würde, wenn das benutzte Prisma ein solches Spektrum geben würde, in welchem der Abstand je zweier Spektrallinien proportional ist der Differenz ihrer Wellenlängen (vgl. § 115).

B. Bestrahlung (Lambertsche Gesetze).

§ 12. Strahlender Punkt.

Unter einem *strahlenden Punkte* werde ein unendlich kleines Element eines strahlenden Körpers oder einer strahlenden Körperoberfläche verstanden.

Über räumlichen Winkel s. Anhang 2.

a) Grundgesetz.

Ein in einem homogenen, nicht absorbierenden Mittel befindlicher strahlender Punkt sendet durch jeden Querschnitt eines von ihm ausgehenden Strahlenkegels denselben Energiestrom.

---

[1]) Wied. Ann. 67, 633 (1899).

[2]) Rubens und Nichols, ebend. 60, 418 (1897); Rubens und Aschkinass, ebend. 65, 241 (1898).

Denn die Strahlen bilden die Bahnen (S. 14), längs welchen sich die Energie fortpflanzt. Durch die Seitenflächen des Strahlenkegels tritt also Energie weder ein noch aus. Mithin muß, falls keine Absorption erfolgt, in jeden Raumteil gleichviel Energie ein- und ausströmen, demnach durch jeden Querschnitt der gleiche Energiestrom fließen.

Den von einem Strahlenkegel eingeschlossenen Raum nennt man einen *räumlichen Winkel.* Dementsprechend wollen wir den durch jeden Querschnitt des Strahlenkegels gehenden konstanten Energiestrom den in den räumlichen Winkel ausgesandten Energiestrom nennen.

Läßt sich der strahlende Punkt als ein unendlich kleines Körperelement auffassen, so strahlt er nach allen Richtungen des Raumes; d. h. die Umgebung, in welche er strahlt, ist der Raumwinkel 4π (ganze Einheitskugel); ein solcher Punkt sendet durch jede beliebige, ihn umschließende Fläche den gleichen Energiestrom hindurch, weil jede solche Fläche ein Querschnitt des Raumwinkels 4π ist.

Läßt sich der strahlende Punkt dagegen als ein unendlich kleines Flächenelement auffassen, so teilt die Ebene des Elementes den Raumwinkel 4π in zwei Teile, nämlich den nach dem Inneren des Körpers gehenden Raumwinkel 2π (innere Halbkugel) und den äußeren Raumwinkel 2π (äußere Halbkugel). In diesem Falle ist *die Umgebung*, in welche der Punkt Energie ausstrahlt, *der äußere Raumwinkel* 2π, und es geht der gleiche Energiestrom durch jede beliebige, in sich zusammenhängende Fläche, welche außen auf der Ebene des Flächenelementes aufsteht, also mit ihr zusammen eine vollständig geschlossene Fläche bildet.

Mittels des angeführten Grundgesetzes kann man den Energiestrom berechnen, den ein Punkt L einem Flächenelemente s zusendet, sobald man die Strahlungsstärke von L in der in Betracht kommenden Richtung Ls kennt.

Fig. 4.

A O L B

b) Strahlungsstärke.

Es möge in Fig. 4 bedeuten:

ALB einen unendlich kleinen räumlichen Winkel;

LO seine Achse;

L einen in seinem Scheitel befindlichen strahlenden Punkt.

Ferner sei ω die Größe des räumlichen Winkels ALB; G der von L in den räumlichen Winkel ω ausgestrahlte Energiestrom.

Alsdann soll unter der Strahlungsstärke U eines Punktes L in der Richtung der Achse LO dieses räumlichen Winkels verstanden werden die Größe

$$U = \frac{G}{\omega} \quad \text{. . . . .} \quad 1)$$

Da ω eine reine Zahl ist, hat U die Dimension eines Energiestromes.

Falls L nach allen Richtungen mit der gleichen Stärke wie in der Richtung LO strahlen würde, können wir auch sagen:

Die Strahlungsstärke U ist der Energiestrom, welcher von L in den räumlichen Winkel 1 ausgestrahlt wird;

oder noch anschaulicher:

Die Strahlungsstärke U ist der Energiestrom, welchen L auf einen der Flächeneinheit gleichen Teil der Oberfläche der „Einheitskugel" ausstrahlt, die mit einem der Längeneinheit gleichen Radius um L beschrieben wird.

Denn dieser Oberflächenteil ist ein Querschnitt des räumlichen Winkels 1.

Im folgenden soll als Einheit des Radius bzw. des Abstandes zweier Elemente, ebenso wie es in der praktischen Photometrie geschieht, das **Meter** gewählt werden; demnach muß als Flächeneinheit für s das **Quadratmeter** gewählt werden.

Aus Gleichung 1) folgt:

$$G = U \cdot \omega \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

mit anderen Worten: Der Energiestrom, welcher von L in den räumlichen Winkel ω ausgestrahlt wird, ist gleich ω multipliziert mit der Strahlungsstärke U, welche L in der Richtung der Achse von ω besitzt.

Dementsprechend ist der Energiestrom, welchen L einem beliebig gelegenen Flächenelement s zusendet, gleich dem räumlichen Winkel ω, unter welchem s von L aus erscheint, multipliziert mit der Strahlungsstärke U, welche L in der Richtung der Achse von ω besitzt.

c) Folgerungen aus dem Grundgesetz.

α) *Entfernungsgesetz.* Es möge (Fig. 5) das von L bestrahlte Flächenelement $a_1 b_1 = s$ in der Entfernung 1 senkrecht zu der Strahlenrichtung LO liegen. Alsdann ist der räumliche Winkel ω, unter welchem s von L erscheint, gleich der Maßzahl von s; ist z. B. $s = n$ qm, wo n eine unendlich kleine Zahl bedeutet, so ist $\omega = n$. Mithin ist in diesem Falle nach Gleichung 2) der von L auf s gesandte Energiestrom

$$G = Us.$$

Konstruieren wir den räumlichen Winkel, unter dem s von L aus erscheint, und schlagen um L als Mittelpunkt Kugeln mit den Radien 2, 3, ... r m, so schneiden diese aus dem räumlichen Winkel die Flächenelemente $a_2 b_2 = 4s$; $a_3 b_3 = 9s$; ... $a_r b_r = r^2 \cdot s$ heraus. Mithin verteilt sich der von L auf s gesandte Energiestrom Us nachher

auf eine vier-, neun-, ... r^2mal so große Oberfläche. Verschieben wir nun s längs der Richtung LO so, daß es stets senkrecht zu LO bleibt, so wird es in der Entfernung r, wo es in die Lage $\alpha\beta$ gelangt, getroffen von dem Energiestrom

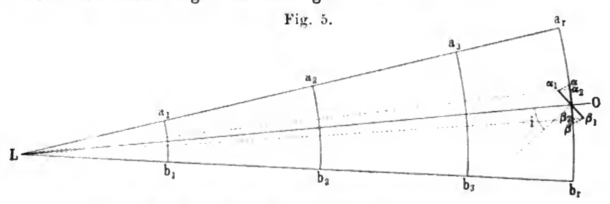
$$G = \frac{Us}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

Wir gelangen also zu dem Satze:

Der Energiestrom, welchen ein Punkt L einem in dem Abstande r senkrecht zu der Strahlenrichtung LO liegenden Flächenelemente s zusendet, ist umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes r.

In der Tat zeigt der Versuch, daß eine Strahlungsquelle, in den Entfernungen 2, 3 ... von dem Strahlungsmesser (Bolometer usw.) aufgestellt, einen 4, 9 ... mal so kleinen Ausschlag des Galvanometers als in der Entfernung 1 hervorbringt.

Fig. 5.



Demnach ist nach der Definitionsgleichung 4) S. 14 die von L auf s erzeugte *Bestrahlung*

$$B = \frac{U}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 4)$$

β) *Kosinusgesetz des Einfallswinkels (cos i-Gesetz).* Das im Abstande r senkrecht zur Strahlenrichtung befindliche Element $\alpha\beta \doteq s$ werde so gedreht, daß es in die Lage $\alpha_1\beta_1$ kommt, in der seine Normale mit der Richtung LO den Winkel i bildet; der Winkel i werde *Einfallswinkel* genannt. Alsdann wird $\alpha_1\beta_1$ von einem kleineren Energiestrom als $\alpha\beta$ getroffen, und zwar von demjenigen Energiestrome, den $\alpha_2\beta_2$, nämlich die Projektion von $\alpha_1\beta_1$ auf $a_r b_r$, erhält; denn $\alpha_1\beta_1$ und $\alpha_2\beta_2$ sind Querschnitte desselben räumlichen Winkels, dessen Scheitel L ist. Nun ist der auf $\alpha_2\beta_2$ fallende Energiestrom gleich dem auf $\alpha\beta$ fallenden Energiestrom $U \cdot s/r^2$, multipliziert mit $\cos i = \alpha_2\beta_2/\alpha_1\beta_1$. Demnach fällt auf $\alpha_1\beta_1$ der Energiestrom

$$G = \frac{Us\cos i}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 5)$$

Mithin erhalten wir den Satz:

Der Energiestrom, welchen ein Punkt L einem im Abstande r befindlichen Flächenelemente s unter dem Einfallswinkel i zusendet, ist $\cos i$ proportional.

Demnach ist die auf s erzeugte Bestrahlung

$$B = \frac{U \cos i}{r^2} \quad \dots\dots\dots\dots \quad 6)$$

In der eben angeführten Weise finden wir gewöhnlich die beiden durch die Gleichungen 3) und 5) ausgedrückten Gesetze entwickelt. Wir können die Gleichung 5), welche Gleichung 3) als speziellen Fall enthält, auch mit einem Schlage ableiten; denn der räumliche Winkel, unter welchem s von L gesehen wird, ist

$$\omega = \frac{s \cos i}{r^2} \quad \dots\dots\dots\dots \quad 7)$$

Setzen wir dies in Gleichung 2) ein, so erhalten wir Gleichung 5).

§ 13. Ein System strahlender Punkte.

Es möge in Fig. 6 bezeichnen:

L', L'' ... ein System voneinander unabhängiger strahlender Punkte;

s ein von ihnen bestrahltes Flächenelement;

r', r'' ... die Entfernungen der Punkte von s;

U', U'' ... die Strahlungsstärken der Punkte in den Richtungen r', r'' ...;

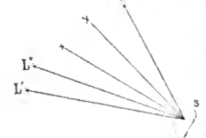
i', i'' ... die Einfallswinkel, unter welchen s von den einzelnen Punkten bestrahlt wird.

Alsdann ist der Energiestrom, welchen s erhält,

$$G = \frac{U' s \cos i'}{r'^2} + \frac{U'' s \cos i''}{r''^2} + \cdots \quad \dots\dots\dots \quad 1)$$

Es sei nun L ein inmitten des Punktsystems gelegener Punkt; r dessen Entfernung von s; i der Einfallswinkel der von L auf s gesandten Strahlen; und es sei ferner s von dem Punktsystem so weit entfernt, daß gesetzt werden kann:

Fig. 6.



$$r' = r'' = \cdots = r; \quad i' = i'' = \cdots = i.$$

Dann geht Gleichung 1) über in

$$G = \frac{(U' + U'' + \cdots) s \cos i}{r^2},$$

wofür, wenn

$$U = U' + U'' + \cdots \quad \dots\dots\dots\dots \quad 2)$$

gesetzt wird, sich schreiben läßt

$$G = \frac{U s \cos i}{r^2} \quad \dots\dots\dots\dots \quad 3)$$

Für hinreichend große Entfernungen befolgt also auch ein System von strahlenden Punkten das Entfernungsgesetz und das Kosinusgesetz des Einfallswinkels. Wir nennen dann die durch Gleichung 2) definierte Größe U die *Strahlungsstärke des Punktsystems in der Richtung Ls und für hinreichend große Entfernungen.*

Mit anderen Worten:

Wir verstehen unter der Strahlungsstärke des Punktsystems für eine gegebene Richtung und für hinreichend große Entfernungen die Strahlungsstärke eines inmitten des Systems gelegenen Punktes, welcher ein in dieser Richtung liegendes und hinreichend weit entferntes Flächenelement ebenso stark wie das Punktsystem bestrahlt.

Dieser inmitten des Systems gelegene *äquivalente* Punkt werde dessen Mitte oder allgemeiner die *Mitte der Strahlungsquelle* genannt.

§ 14. Strahlendes Flächenelement.

a) Strahlungsstärke und Emissionsvermögen.

Da wir uns ein Flächenelement als aus lauter punktförmigen Flächenelementen zusammengesetzt denken können, dürfen wir in aller Strenge auch von der *Strahlungsstärke eines Flächenelementes* und zwar für jede beliebige endliche Entfernung sprechen, da jede solche Entfernung hinreichend groß im Vergleich zu den Dimensionen des Flächenelementes ist.

Fig. 7.

In Fig. 7 soll bezeichnen:

$AB = \sigma$ ein Element einer strahlenden Oberfläche;

MN die Senkrechte auf AB;

MO eine beliebige Ausstrahlungsrichtung;

ε den Winkel zwischen MN und MO, den sogenannten *Ausstrahlungs- oder Emissionswinkel*;

BC eine zu MO senkrechte Richtung;

BD die Projektion von AB auf BC, die sogenannte scheinbare Größe von AB in Richtung MO, d. h. unter dem Ausstrahlungswinkel ε.

Alsdann ist

$$BD = \sigma \cos \varepsilon.$$

Es sei ferner

U die *Strahlungsstärke von σ unter dem Ausstrahlungswinkel* ε.

Da sich die von den einzelnen Punkten von σ kommenden Strahlungen nicht stören (nicht interferieren), sondern einfach summieren, so ist U proportional der Größe σ.

Es läßt sich nun nachweisen (§ 15), daß für den **schwarzen Körper** U proportional $\cos\varepsilon$ ist. Ist für diesen die Strahlungsstärke von σ in zum Elemente senkrechter Richtung, also für $\varepsilon = 0$,

$$\eta\,\sigma,$$

so ist sie unter dem Ausstrahlungswinkel ε

$$U = \eta\,\sigma \cos\varepsilon \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Man sagt darum: *der schwarze Körper befolgt das* $\cos\varepsilon$*-Gesetz* (§ 30, e).

Auch die Strahlungsstärke U des Elementes σ einer **beliebigen** strahlenden Fläche läßt sich auf die nämliche Form 1) bringen; jedoch ist dann der Proportionalitätsfaktor η im allgemeinen mit dem Ausstrahlungswinkel ε mehr oder weniger veränderlich.

Die Größe η, welche durch Gleichung 1) oder durch die daraus folgende Gleichung

$$\eta = \frac{U}{\sigma \cos\varepsilon} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

definiert ist, werde als das *Emissionsvermögen*[1]) *des Elementes* σ *unter dem Ausstrahlungswinkel* ε bezeichnet.

Demnach ist das Emissionsvermögen η gleich dem Verhältnis aus der Strahlungsstärke von σ und der scheinbaren Größe von σ,

oder anders ausgedrückt:

gleich der für die Einheit der scheinbaren Oberfläche berechneten Strahlungsstärke.

Als Einheit der strahlenden Oberfläche soll hier, ebenso wie in der praktischen Photometrie, das **Quadratcentimeter** genommen werden.

Anschaulicher können wir dann, wie hier vorausgeschickt werden möge (vgl. § 32), sagen:

Das Emissionsvermögen η ist die für hinreichend große Entfernung geltende Strahlungsstärke einer ebenen Fläche, deren scheinbare Größe unter dem Ausstrahlungswinkel ε gleich 1 qcm, deren wirkliche Größe also gleich $1/\cos\varepsilon$ qcm ist.

Andere Definitionen des Emissionsvermögens.

Man denke sich (Fig. 8) zwei miteinander fest verbundene undurchsichtige Schirme, welche je eine unendlich kleine Öffnung f und f_1 haben. Dieses Diopter werde vor der leuchtenden Fläche so aufgestellt, daß die Verbindungslinie der Mitten von f und f_1, die sogenannte Diopterachse, auf das Flächenelement σ trifft. **Kirchhoff** versteht dann unter dem Emissionsvermögen von σ in Richtung der Diopterachse den Energiestrom, welchen der Körper durch das Diopter hin-

[1]) Drude nennt diese Größe „Strahlungsintensität".

durchsendet. Ist η das oben definierte Emissionsvermögen, so ist das Emissionsvermögen nach Kirchhoff (gemäß § 36)

$$\eta \cdot \frac{f f_1 \cos\varphi \cos\varphi_1}{d^2},$$

wenn d den Abstand zwischen f und f_1, ferner φ und φ_1 die Winkel bezeichnen, welche Richtung d mit den Loten auf f und f_1 bildet. Das Kirchhoffsche Emissionsvermögen ist also dem von uns definierten proportional, und zwar ist der Proportionalitätsfaktor nur abhängig von der Größe und Lage der Flächenelemente f und f_1 zu einander.

Fig. 8.

Lummer und Pringsheim verstehen bei ihren grundlegenden Arbeiten über Strahlungsgesetze (§ 17) unter dem Emissionsvermögen den von 1 qcm ebener Fläche in die Umgebung, also in den äußeren Raumwinkel 2π, ausgesandten Energiestrom.

b) Bestrahlung eines Flächenelementes durch ein anderes.

Das erwähnte Element σ möge unter dem Austrahlungswinkel ε (Fig. 9) das Element s bestrahlen; r sei die Entfernung beider Elemente und i der Einfallswinkel auf s. Alsdann ist der Energiestrom G, welcher von σ auf s übergeht, nach Gleichung 3), S. 30

Fig. 9.

$$G = \frac{U s \cos i}{r^2}.$$

Setzen wir hierin den Wert von U aus Gleichung 1) ein, so wird

$$G = \frac{\eta \sigma s \cos\varepsilon \cos i}{r^2} \quad \text{. . . . . 3)}$$

In dieser Form hat Lambert[1]) sein sogenanntes *zusammengesetztes photometrisches Grundgesetz* aufgestellt (S. 76).

Die Bestrahlung von s ist also

$$B = \frac{\eta \sigma \cos\varepsilon \cos i}{r^2} \quad \text{. . . . . 4)}$$

Andere Schreibweisen für Gleichung 3). Der räumliche Winkel ω, unter welchem s von σ erscheint, ist, da r in Metern, s in Quadratmetern gemessen wird (S. 28), nach Gleichung 5), Anhang 2

$$\omega = \frac{s \cos i}{r^2} \quad \text{. . . . . 5)}$$

[1]) Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae. Augsburg 1760. Deutsch von E. Anding, Nr. 31, 32, 33 von Ostwalds Klassikern der exakten Wissenschaften; Leipzig, Wilhelm Engelmann, 1892.

so daß Gleichung 3) übergeht in

$$G = \eta\, \sigma\, \omega \cos \varepsilon \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Ferner ist der räumliche Winkel Ω [1]), unter dem σ von s erscheint, da σ in Quadratcentimetern (S. 32), r in Metern gezählt wird,

$$\Omega = \frac{\sigma \cos \varepsilon}{10\,000\, r^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

demnach

$$G = 10\,000\, \eta\, s\, \Omega \cos i \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Folgerung aus Gleichung 3).

Das Element σ eines Körpers (z. B. des schwarzen Körpers), dessen Emissionsvermögen η unter allen Ausstrahlungswinkeln konstant ist, sendet in seine Umgebung den Energiestrom

$$G_1 = \pi\, \eta\, \sigma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

Mithin strahlt die Flächeneinheit (1 qcm ebene Fläche) im ganzen aus:

$$G_2 = \pi\, \eta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

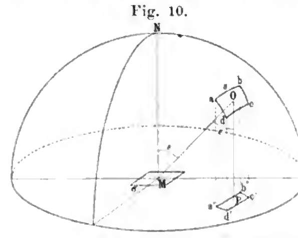
so daß

$$\eta = \frac{G_2}{\pi} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

In diesem Falle hat also die Größe η die physikalische Bedeutung, daß sie den durch π geteilten Energiestrom bezeichnet, welchen die Flächeneinheit in ihre Umgebung sendet. η ist hier also der π^{te} Teil des Emissionsvermögens nach Lummer und Pringsheim (S. 33).

Beweis zu Gleichung 9): Wir wollen als speziellen Querschnitt des äußeren Raumwinkels 2π die Halbkugel (Fig. 10) nehmen, welche auf der Ebene von σ aufsteht und um die Mitte M des Elementes σ mit dem Radius 1 beschrieben ist. Wir zerlegen dann die Oberfläche der Halbkugel in lauter Elemente s. In der Figur ist $abcd$ ein solches Element, O dessen Mitte. Ist ε der Winkel zwischen MN (der Normalen auf σ) und MO (der Richtung σs), so ist der von σ nach s übergehende Energiestrom nach Gleichung 3), da $i = 0$ ist,

Fig. 10.



$$\eta\, \sigma\, s \cos \varepsilon.$$

[1]) Würde σ in Quadratmetern gezählt, so wäre $\Omega = \sigma \cos \varepsilon / r^2$, so daß $G = \eta\, s\, \Omega \cos i$. Hierin ist die Größe η, weil sie auf das Quadratmeter bezogen ist, 10 000 mal so groß wie in den Gleichungen 3), 4), 6) und 8).

Mithin ist

$$G_1 = \eta\,\sigma \sum s \cos \varepsilon \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

wo die Summation über alle Elemente s zu erstrecken ist.

Andererseits ist ε auch der Winkel, welchen die auf s errichtete Senkrechte OM (der Kugelradius) mit der von s auf die Ebene von σ gefällten Senkrechten OP bildet; demnach ist $s \cos \varepsilon$ die Projektion $a' b' c' d'$ von s auf die Ebene von σ. Die Summe sämtlicher Projektionen ist gleich dem Flächeninhalt des um die Mitte von σ mit dem Radius 1 beschriebenen und in der Ebene von σ liegenden Kreises, also gleich π. Dies in Gleichung 12) eingesetzt, ergibt Gleichung 9).

c) Zerlegung des Energiestromes.

Das Flächenelement σ soll Strahlen von stetig ineinander übergehenden Werten der Wellenlänge aussenden. Von dem Energiestrom, welcher dann von σ nach s geht, wollen wir den Teil betrachten, dessen Wellenlängen zwischen λ und $\lambda + \varDelta$ liegen, wo $\varDelta$ als eine unendlich kleine Größe aufzufassen ist. Dieser letztere Teilbetrag läßt sich in der Form schreiben

$$\frac{\eta_\lambda\, \sigma\, s \cos \varepsilon \cos i}{r^2} \cdot \varDelta.$$

Wir wollen dann η_λ das *Einzelemissionsvermögen* des Elementes σ unter dem Ausstrahlungswinkel ε und für die Wellenlänge λ nennen.

Es sollen jetzt λ_1 und λ_2 zwei beliebige Wellenlängen bezeichnen. Setzt man

$$\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{n} = \varDelta,$$

so kann man das Intervall von λ_1 bis λ_2 in n die gleich großen Gebiete

λ_1 bis $\lambda_1 + \varDelta$; $\lambda_1 + \varDelta$ bis $\lambda_1 + 2\varDelta$; ....
$\lambda_1 + (n-1)\varDelta$ bis $\lambda_1 + n\varDelta$ ($= \lambda_2 - \varDelta$ bis λ_2)

teilen. Alsdann ist, wenn zur Abkürzung gesetzt wird

$$\frac{\sigma\, s \cos \varepsilon \cos i}{r^2} = f$$

der im ersten Intervall von σ nach s übergehende Energiestrom $f \cdot \eta_{\lambda_1} \cdot \varDelta$;
der im zweiten Intervall übergehende $f \cdot \eta_{\lambda_1 + \varDelta} \cdot \varDelta$;
der im letzten Intervall übergehende $f \cdot \eta_{\lambda_1 + (n-1)\varDelta} \cdot \varDelta$ $= f \cdot \eta_{\lambda_2 - \varDelta} \cdot \varDelta$.

Mithin wird der gesamte zwischen den Wellenlängen λ_1 und λ_2 von σ nach s gehende Energiestrom dargestellt durch

$$G_{1,2} = f \cdot \sum \eta_\lambda\, \varDelta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

wobei sich das Summenzeichen Σ auf die Addition aller Glieder bezieht, welche für

$$\lambda = \lambda_1;\ \lambda_1 + \Delta;\ \lambda_1 + 2\Delta;\ \ldots;\ \lambda_2 - \Delta$$

aus η_λ hervorgehen.

Besser noch ist die Bezeichnung

$$G_{1,2} = f \cdot \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_\lambda \Delta \quad \ldots \ldots \ldots \quad 14)$$

wobei man zu beachten hat, daß λ_1 der erste Wert von λ, daß jeder folgende um Δ größer und daß endlich $\lambda_2 - \Delta$ der letzte Wert von λ sein soll. Insofern als Δ die Differenz zweier unendlich nahe liegender Werte des λ ausmacht, eignet sich das Zeichen $d\lambda$ besser als Δ; also erhalten wir

$$G_{1,2} = f \cdot \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_\lambda \, d\lambda \quad \ldots \ldots \ldots \quad 15)$$

wobei zur besseren Unterscheidung üblich geworden ist, statt des griechischen Buchstabens Σ den lateinischen Buchstaben $\int$, das sogenannte Integralzeichen, zu gebrauchen. Demnach können wir auch schreiben:

$$G_{1,2} = \frac{\sigma\, s \cos \varepsilon \cos i}{r^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_\lambda \, d\lambda \quad \ldots \ldots \quad 16)$$

Setzen wir

$$\eta_{1,2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_\lambda \, d\lambda \quad \ldots \ldots \ldots \quad 17)$$

so erhalten wir für $G_{1,2}$ einen Ausdruck, der sich von der rechten Seite von Gleichung 3) nur dadurch unterscheidet, daß $\eta_{1,2}$ an die Stelle von η tritt.

Dementsprechend werde die durch Gleichung 17) definierte Größe als das *Emissionsvermögen von σ zwischen den Wellenlängen λ_1 und λ_2* bezeichnet.

Das Emissionsvermögen für das Gebiet der leuchtenden Strahlen oder kürzer das *Emissionsvermögen für die leuchtenden Strahlen* erhalten wir, wenn wir für λ_1 und λ_2 die äußersten sichtbaren Wellenlängen, also λ_1 gleich etwa 0,4, und λ_2 gleich etwa 0,8 μ setzen.

Das *gesamte Emissionsvermögen* zwischen den Wellenlängen 0 und ∞ ist

$$\eta = \int_0^\infty \eta_\lambda \, d\lambda \quad \ldots \ldots \ldots \quad 18)$$

d) Bestrahlung eines diffus reflektierenden Flächenelementes.

Eine Strahlungsquelle L (Fig. 11) soll ein diffus reflektierendes Flächenelement σ bestrahlen, welches wiederum das Element s durch diffuse Reflexion bestrahlen soll. Ferner sei:

Fig. 11.

r bzw. r' der Abstand zwischen σ und L bzw. σ und s;
i der Einfallswinkel auf σ;
ε der Ausstrahlungswinkel für σ;
i' der Einfallswinkel auf s;
U die Strahlungsstärke von L in Richtung r.



Alsdann ist der von L nach σ gesandte Energiestrom

$$G = \frac{U \sigma \cos i}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots 19)$$

und die auf σ erzeugte Bestrahlung

$$B = \frac{U \cos i}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots 20)$$

Durch die Bestrahlung B erlangt σ unter dem Ausstrahlungswinkel ε das Emissionsvermögen

$$\eta = m \cdot B \quad \ldots \ldots \ldots \ldots 21)$$

wo m eine gewisse Größe ist (S. 78 und 79). Mithin ist der Energiestrom, welcher von σ nach s reflektiert wird, nach Gleichung 3)

$$G' = \frac{\eta \sigma s \cos i' \cos \varepsilon}{r'^2}$$

und mit Rücksicht auf Gleichung 21)

$$G' = \frac{m \cdot B \sigma s \cos i' \cos \varepsilon}{r'^2}$$

oder, da allgemein nach Gleichung 19) und 20) — vgl. Gleichung 4), S. 14 —

$$B \sigma = G$$

ist,

$$G' = \frac{m\, G \cdot s \cos i' \cos \varepsilon}{r'^2} \quad \ldots \ldots \ldots 22)$$

Setzen wir den von m und von rein geometrischen Größen abhängigen Ausdruck

$$\frac{m\, s \cos i' \cos \varepsilon}{r'^2} = f' \quad \ldots \ldots \ldots \ldots 23)$$

so können wir Gleichung 22) schreiben

$$G' = f' \cdot G \quad \ldots \ldots \ldots \ldots 24)$$

Mit anderen Worten: Von dem von L auf σ ausgesandten Energiestrom G wird nach s der durch Gleichung 23) gegebene Bruchteil f' diffus reflektiert.

Der vollständige Ausdruck für G' ist

$$G' = \frac{U \sigma \cos i}{r^2} \cdot \frac{m s \cos \varepsilon \cos i'}{r'^2} \quad \text{. . . . . . . 25)}$$

Ist σ ein grauer Körper (S. 20), so hat G' dieselbe spektrale Zusammensetzung wie der auf σ auffallende Energiestrom G.

C. Ausstrahlung.

§. 15. Kirchhoffs Gesetz über das Verhältnis zwischen der Emission und Absorption.

Die verschiedenen Körper strahlen je nach ihrer Natur bei gleicher Temperatur verschieden viel Wärme (Energie) aus. Leslie war der erste, welcher diesbezügliche Versuche anstellte. Er benutzte einen mit heißem Wasser gefüllten Hohlwürfel aus Blech, dessen eine Fläche blank poliert, dessen andere rauh gemacht oder mit Überzügen von Bleiweiß, Kienruß, Lack usw. versehen war. Je nachdem bei gleicher Temperatur verschiedene Flächen des Würfels dem Differentialthermometer oder der Thermosäule in der gleichen Entfernung zugewandt waren, beobachtete er verschiedene Grade der Erwärmung, und zwar war die Ausstrahlung der blank polierten Metallfläche des Würfels am kleinsten, die der mit Kienruß geschwärzten Fläche am größten.

Umgekehrt besitzen diejenigen Körper, welche die Wärme stark ausstrahlen, auch ein großes Absorptionsvermögen. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen der Emission und Absorption. Dieser Zusammenhang war schon lange vor Kirchhoff bekannt — z. B. de la Provostaye und Desains[1]), Stewart[2]) —. Kirchhoff[3]) jedoch gebührt das Verdienst, diese Gesetzmäßigkeit durch Einführung der Definition des schwarzen Körpers genau formuliert und mathematisch begründet zu haben.

Mathematischer Ausdruck des Gesetzes. Es sei: σ ein Oberflächenelement eines beliebigen Temperaturstrahlers, welches das irgendwie gelegene Element s bestrahlen möge; η_λ das Einzelemissionsvermögen von σ für die beliebige Wellenlänge λ und Richtung σs (S. 35); A_λ das Absorptionsvermögen von σ für dieselbe Wellenlänge λ und die Auffallsrichtung $s\sigma$ (S. 16). Alsdann ist nach Kirchhoff

$$\frac{\eta_\lambda}{A_\lambda} = H_\lambda, \quad \text{. . . . . 1)}$$

[1]) C. R. 36, 84 (1853).
[2]) Proc. Edinb. Soc., p. 95 (1857/58); p. 203 (1858/59).
[3]) Pogg. Ann. 109, 275 (1860).

wo H_λ eine von der Natur des strahlenden Körpers und der Ausstrahlungsrichtung unabhängige Naturkonstante ist.

Für den schwarzen Körper (S. 20) ist für jede Wellenlänge $A_\lambda = 1$; in diesem Falle wird

$$\eta_\lambda = H_\lambda \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Mithin bezeichnet H_λ das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers für die Wellenlänge λ und die Temperatur von σ.

Zusammenfassend können wir also sagen:

Das Verhältnis zwischen dem Einzelemissionsvermögen η_λ und dem auf dieselbe Wellenlänge und Strahlenneigung bezogenen Absorptionsvermögen eines beliebigen Temperaturstrahlers ist konstant, nämlich gleich dem Einzelemissionsvermögen H_λ des schwarzen Körpers für die gleiche Wellenlänge und Temperatur.

Dieser Satz gilt nicht nur für unpolarisierte Strahlen, sondern auch für polarisierte Strahlen jeder Schwingungsrichtung.

Da H_λ von der Strahlenrichtung nicht abhängig ist, so folgt unmittelbar

der schwarze Körper befolgt für jede Wellenlänge das $\cos \varepsilon$-Gesetz [vgl. Gleichung 1), S. 32, ferner S. 77].

Einen verhältnismäßig einfachen Beweis des Satzes gibt Drude[1]).

Folgerungen.

Diese Folgerungen sind zum allergrößten Teile schon von Kirchhoff selbst gezogen.

Folgerung a) Aus Gleichung 1) folgt [vgl. Fußnote 2), S. 83].

$$\eta_\lambda = A_\lambda \cdot H_\lambda \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Sind H_λ und A_λ gegeben, so kann man also η_λ aus Gleichung 3) bestimmen. Mithin sendet ein Element σ, dessen Absorptionsvermögen in Richtung $s\sigma$ gleich A_λ ist, in dem Wellenlängenbereich λ und $\lambda + d\lambda$ nach s (Fig. 9, S. 33) den Energiestrom

$$A_\lambda H_\lambda \cdot \frac{\sigma\, s \cos \varepsilon \cos i}{r^2} \cdot d\lambda.$$

Ist beispielsweise $A_\lambda = 0{,}5$, so sendet der betreffende Temperaturstrahler von σ nach s einen nur halb so großen Energiestrom wie der schwarze Körper bei derselben Temperatur.

Kennen wir also das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers H_λ für jede Temperatur und Wellenlänge λ, so können wir auch das Emissionsvermögen η_λ jedes beliebigen Temperaturstrahlers berechnen, sobald uns sein Absorptionsvermögen A_λ ebenfalls als Funktion der Wellenlänge und Temperatur bekannt ist. Durch das Kirchhoffsche Gesetz sind also die Strahlungsgesetze aller Tempe-

---

[1]) Lehrbuch der Optik, S. 454. Leipzig, S. Hirzel. 1900.

raturstrahler auf dasjenige des schwarzen Körpers zurückgeführt.

Es war deshalb von größter Wichtigkeit, die Funktion H_λ in ihrer Abhängigkeit von Wellenlänge und Temperatur zu bestimmen. Diese Aufgabe ist für das untersuchte Temperatur- und Wellenlängengebiet praktisch als gelöst zu betrachten (s. Gesetz IV, S. 45 und 46).

Folgerung b) Von allen Temperaturstrahlern hat der schwarze Körper für alle Wellenlängen und Temperaturen das größtmögliche Absorptionsvermögen, nämlich 1, demnach auch das größte Emissionsvermögen. Mit anderen Worten: Mit keiner auf reiner Temperaturstrahlung beruhenden Lichtquelle kann man ein größeres Emissionsvermögen und deshalb eine größere Lichtstärke erzielen als mit dem schwarzen Körper derselben Temperatur. Dem schwarzen Körper folgen die übrigen Körper in der Reihenfolge ihres Absorptionsvermögens für die betreffenden Wellenlängen.

Mithin müssen Metalle, welche auch bei hoher Temperatur ein großes Reflexionsvermögen, also ein kleines Absorptionsvermögen besitzen, viel weniger leuchten, als ein gleichtemperierter schwarzer Körper. In der Tat tritt ein Tintenstrich auf der Oberfläche eines zur Rotglut erhitzten Platinbleches als heller Streifen auf dunklerem Grunde hervor.

Deshalb leuchten die durchsichtigen Gase der Bunsen- und Knallgasflamme, welche die Lichtstrahlen nahezu ungehindert hindurchlassen, anstatt sie zu verschlucken, kaum, während die stark absorbierende Kohle in den leuchtenden Flammen schon bei verhältnismäßig niedriger Temperatur ein relativ starkes Licht aussendet.

Ferner muß ein glühender Körper, der vorzugsweise bestimmte Strahlengattungen absorbiert, auch diese vorzugsweise aussenden. Mithin muß ein Körper, welcher alle Lichtwellen absorbiert (für diese also das Absorptionsvermögen 1 besitzt), dagegen alle ultraroten Wellen teils reflektiert, teils durchläßt (für diese Wellen also das Absorptionsvermögen 0 besitzt) nur Licht, dagegen keine dunkle Wärme ausstrahlen. Einen wenigstens denkbaren Körper, der diese Eigenschaft besitzt, nennt Lummer einen *idealen Temperaturstrahler.*

Folgerung c) Im folgenden wollen wir nur die elastische Theorie [1]) zugrunde legen und mit Fresnel (im Gegensatz zu Neumann) annehmen, daß das von einer hinten geschwärzten Glasplatte unter dem Polarisationswinkel reflektierte, also vollständig polarisierte Licht senkrecht zur Reflexionsebene schwingt (vgl. § 93, e).

Ein Körper, der von Strahlen *einer* Schwingungsrichtung mehr als von denen einer *anderen* absorbiert, sendet in demselben Ver-

[1]) Bei der elektromagnetischen Theorie entsprechen die elektrischen Schwingungen den elastischen.

hältnis Strahlen von der ersten Schwingungsrichtung mehr aus als von der zweiten. Demnach muß ein glühender, undurchsichtiger Körper mit glatter Oberfläche in Richtungen, die schief zu dieser Oberfläche sind, Licht aussenden, das teilweise polarisiert ist und zwar in der Ebene schwingt, die durch den Strahl und die Normale der Oberfläche geht; denn von einfallenden Strahlen, die in der Einfallsebene schwingen, reflektiert der Körper weniger, absorbiert also mehr als von den Strahlen, deren Schwingungsebene senkrecht zur Einfallsebene ist. Man kann den Polarisationszustand der ausgesandten Strahlen angeben, sobald man das Gesetz der Reflexion auffallender Strahlen kennt.

Folgerung d) *Wenn ein Raum von Körpern gleicher Temperatur umschlossen ist und durch diese Körper keine Strahlen hindurchdringen können, so zeigt das von jeder Stelle der Oberfläche dieses Hohlraumes nach dem Inneren gehende Strahlenbündel, welches sich aus direkt ausgesandten und reflektierten Strahlen zusammensetzt, genau dieselbe Beschaffenheit, als ob es von der Oberfläche eines schwarzen Körpers kommt; es ist also unabhängig von der Beschaffenheit und Gestalt der Körper und nur durch die Temperatur bedingt.*

Ist also für irgend eine Oberflächenstelle des Hohlraumes und bezogen auf irgend eine Ausstrahlungsrichtung

η_1 das Emissionsvermögen für den direkt ausgestrahlten Energiestrom (Eigenstrahlung),

η_2 das Emissionsvermögen für den reflektierten Energiestrom (erborgte Strahlung),

so ist

$\eta_1 + \eta_2$ konstant, nämlich gleich dem Emissionsvermögen H des schwarzen Körpers.

§ 16. Herstellung des schwarzen Körpers.

Aus der Folgerung d) des vorigen Paragraphen zogen zuerst Lummer und Wien[1]) den nachstehenden Schluß, durch welchen die Grundlage für die experimentelle Erforschung der Temperaturstrahlung geschaffen wurde.

Erhitzt man einen mit einer kleinen Öffnung versehenen Hohlraum auf eine überall gleichmäßige Temperatur, so ist die ***aus dieser Öffnung*** *austretende Strahlung praktisch mit der des schwarzen Körpers identisch.*

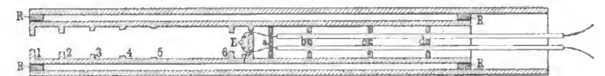
Die Strahlung des schwarzen Körpers wird nach Thiesen *schwarze Strahlung* genannt.

Zur Herstellung des schwarzen Körpers benutzt man für niedere Temperaturen Hohlräume aus Metall, die man in geeigneter Weise

[1]) Wied. Ann. 56, 451 (1895).

(durch flüssige Luft, Eis, Dampf siedenden Wassers und andere Bäder) auf die Untersuchungstemperatur erwärmt. Bis zu Temperaturen von 1500° C (Schmelzpunkt des Porzellans 1600° C) benutzen Lummer und Kurlbaum [1]) den zylindrischen Hohlraum eines Porzellanrohres (Fig. 12). Die Heizung erfolgt durch einen starken elektrischen

Fig. 12.



Strom, der einen über das Rohr gestülpten, wegen seiner geringen Dicke in der Figur nicht gezeichneten Mantel aus dünnem Platinblech durchfließt. Der Mantel ist zum Zusammenhalten der Wärme hinten ganz, vorn bis auf die Ausstrahlungsöffnung geschlossen. Das Porzellanrohr trägt fest eingebrannt in seiner Mitte eine Querwand 7, vorn eine Reihe von Diaphragmen (1 bis 6), welche den Strahlungsraum vor allzu starker Abkühlung durch die eindringende Luft schützen sollen. Das Innere des Strahlungsrohres ist mittels einer Mischung aus Chrom-, Nickel- und Kobaltoxyd geschwärzt, welche Schwärzung selbst Temperaturen über 1500° C standhält. Ein mit Asbest bekleidetes, eng auf den Ringen R aufliegendes Überstülprohr dient zum Schutze

Fig. 13.

[1]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 17, 106 (1898).

gegen Wärmeverlust. Die von der Querwand 7 ausgehende Strahlung tritt durch die Öffnung bei 1 aus. *E* ist ein Thermoelement, dessen Drähte durch die Löcher der Querwände 7, *a*, *b* ... hindurchgezogen sind.

Für Temperaturen über 1500° C bedienen sich Lummer und Pringsheim [1]) eines elektrisch geglühten dünnwandigen Kohlerohres *R* (Fig. 13). Ein Pfropfen *P* aus Kohle wird als strahlende Rückwand benutzt. Um die Außenseite der Kohle vor dem Verbrennen zu schützen, ist das Rohr möglichst hermetisch von einem zweiten, elektrisch von ihm isolierten Kohlerohr umgeben. Der Eintritt des atmosphärischen Sauerstoffs in das Innere des Rohres wird dadurch verhindert, daß die Strahlungsöffnung *F* mit Stickstoff gespült wird. Zum Schutze gegen Wärmeverlust ist das Kohlerohr durch mehrfache Hüllen aus schwer schmelzbarer Masse mit Luftzwischenräumen umgeben. *D D* sind Kupferscheiben, welche die Hitze von den Stromzuführungen *B B* ableiten.

§ 17. Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers, des blanken Platins und anderer Körper.

Es möge wieder bezeichnen:

η_λ bzw. H_λ das Einzelemissionsvermögen eines beliebigen Temperaturstrahlers bzw. des schwarzen Körpers für die Wellenlänge λ (S. 35);

η bzw. H das entsprechende Gesamtemissionsvermögen (S. 36 unten).

Emissionskurven. Um ein übersichtliches Bild über die Abhängigkeit der Funktionen η_λ und H_λ (oder *allgemeiner der Funktion* η_λ, da H_λ ein spezieller Fall von η_λ ist) von der Wellenlänge λ zu erhalten [2]), trägt man die einzelnen λ als Abszissen und die zugehörigen Werte η_λ als Ordinaten eines rechtwinkeligen Koordinatensystems auf und verbindet die so erhaltenen Punkte durch eine Kurve, welche wir als Emissionskurve bezeichnen wollen. Fig. 14 a und b zeigen mehrere von Lummer und Pringsheim gefundene Kurven, die sich auf den schwarzen Körper und blankes Platin bei den dort angegebenen absoluten Temperaturen beziehen. Unter absoluter Temperatur Θ wird die um 273 vermehrte Temperatur in Celsiusgraden verstanden; eine Temperatur von 200° C ist also in der absoluten Temperaturskala gleich 473°.

Aus diesen Kurven kann man dann die größte Ordinate, also das maximale Einzelemissionsvermögen, welches im folgenden mit η_{max} bezeichnet wird, und die Wellenlänge λ_{max} ablesen, welche diesem maximalen Werte entspricht.

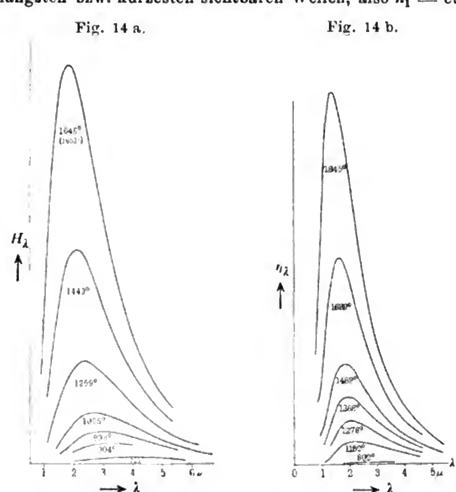
---

[1]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 5, 3 (1903).

[2]) Die Wellenlänge λ soll in Fig. 14 a und b in μ gezählt werden.

Die Figuren[1]) beziehen sich auf Wellenlängen λ von etwa 1 bis 6 μ. Denkt man sich jede Kurve bis $\lambda = 0$ und $\lambda = \infty$ verlängert, so stellt die von der *ganzen Kurve* und der Abszissenachse begrenzte Fläche das *gesamte Emissionsvermögen* des Körpers dar. Sind λ_1 und λ_2 zwei beliebige Wellenlängen, η_{λ_1} und η_{λ_2} die dazu gehörigen Ordinaten, so gibt das von diesen Ordinaten aus der ganzen Fläche herausgeschnittene Flächenstück ein Maß für das Emissionsvermögen für den Bezirk zwischen den Wellenlängen λ_1 und λ_2. Sind speziell λ_1 und λ_2 die längsten bzw. kürzesten sichtbaren Wellen, also $\lambda_1 =$ etwa 0,4 μ

Fig. 14 a. Fig. 14 b.



und $\lambda_2 =$ etwa 0,8 μ, so stellt diese Fläche, welche wir nach Lummer der Kürze halber als Leuchtfläche bezeichnen wollen, das *Emissionsvermögen für die leuchtenden Strahlen dar* (S. 36). Wie aus den Figuren zu ersehen ist, ist diese Fläche für jede Kurve sehr klein im Vergleiche zu der ganzen Fläche.

a) Schwarzer Körper.

Es gelten hier folgende Gesetze:

1. Stefan-Boltzmannsches Gesetz. H ist proportional der vierten Potenz der absoluten Temperatur Θ; es ist also

$$H = C\Theta^4 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{I}$$

---

[1]) Die Maßstäbe der beiden Figuren sind voneinander verschieden.

wo nach Kurlbaum (vgl. S. 25 und Tabelle auf S. 47)

$$C = 0{,}408 \cdot 10^{-12}\,\text{g-kal./sek}\ ^{1)}.$$

Dieses Gesetz wurde von Stefan[2]) auf Grund der bisherigen Messungen empirisch aufgestellt und von Boltzmann[3]) aus der Maxwellschen Theorie des Ätherdruckes mittels rein thermodynamischer Überlegungen theoretisch abgeleitet.

Mithin strahlt 1 qcm des schwarzen Körpers von der absoluten Temperatur 1^0 in seine Umgebung in der Sekunde den Energiestrom $\pi C = 1{,}28 \cdot 10^{-12}$ g-kal. $= 5{,}32 \cdot 10^{-12}$ Watt [s. Formel 10), S. 34].

2. Wiensches Verschiebungsgesetz. Auf thermodynamischer Grundlage entwickelte Wien[4]) 1893 sein Verschiebungsgesetz. Dieses enthält zwei uns hier besonders interessierende Gesetze, welche sich auf die Lage und Größe des maximalen Emissionsvermögens im Normalspektrum beziehen. Das erste Gesetz sagt aus, daß λ_{max} der absoluten Temperatur Θ umgekehrt proportional ist, so daß sich λ_{max} mit steigender Temperatur nach den kürzeren Wellen, d. h. nach dem violetten Ende des Spektrums verschiebt. Das zweite Gesetz sagt aus, daß H_{max} der fünften Potenz von Θ proportional ist. Es ist also

$$\lambda_{max}\,\Theta = C_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{II}$$

$$H_{max} = C_2\,\Theta^5 \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{III}$$

3. Wien-Plancksche Spektralgleichung. Nach Planck[5]) besteht zwischen der Kirchhoffschen Strahlungsfunktion H_λ, der Wellenlänge λ und der absoluten Temperatur Θ die folgende Gleichung, welche also die Verteilung der Energie im Spektrum des schwarzen Körpers angibt:

$$H_\lambda = \frac{C_3}{\lambda^5\left(e^{\frac{c}{\lambda\Theta}} - 1\right)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{IV}$$

Hierin ist e die Basis des natürlichen Logarithmensystems.

Wird die Wellenlänge λ in cm gemessen, so ist nach Lummer und Pringsheim

$$C_1 = 0{,}294; \quad c = 1{,}46$$

und nach Kohlrausch[6])

$$C_2 = 0{,}914 \cdot 10^{-12}\ ^{1)}; \quad C_3 = 0{,}285 \cdot 10^{-12}\,\text{g-kal./sek}\ ^{1)}.$$

---

[1]) Dieser Wert ist der π^{te} Teil der vom zitierten Autor angegebenen Zahl, welche sich auf den in den Raumwinkel 2π ausgesandten Energiestrom bezieht. [Vgl. Gleichung 11), S. 34].

[2]) Wien. Ber. **79** (2), 391 (1879).

[3]) Wied. Ann. **22**, 31 und 291 (1884).

[4]) Berl. Ber. S. 55 (1893).

[5]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. **2**, 202 (1900); Ann. d. Phys. **4**, 553 (1901).

[6]) Lehrb. d. Prakt. Physik, S. 340. Leipzig u. Berlin, B. G. Teubner. 1905.

4. Wiensche Spektralgleichung. Schon vor Planck hatte Wien[1]), von kinetischen Hypothesen ausgehend, folgende Spektralgleichung aufgestellt:

$$H_\lambda = \frac{C_3}{\lambda^5 \cdot e^{\frac{c}{\lambda \Theta}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad V$$

Das Gesetz IV unterscheidet sich von V äußerlich nur durch den im Nenner in der Klammer stehenden Subtrahend 1. Diese 1 erlangt größere Bedeutung erst dann, wenn sich $e^{\frac{c}{\lambda \Theta}}$ der 1 nähert, z. B. gleich 1,65 ist, welchem Werte $\lambda \Theta =$ etwa 3,0 cm · Grad entspricht.

Diese Gesetze sind von verschiedenen Beobachtern untersucht, besonders eingehend und vollständig von Lummer, teils gemeinsam mit Kurlbaum, teils gemeinsam mit Pringsheim. Es wurden die Strahlungsgesetze I, II und III von der Temperatur der flüssigen Luft bis $\Theta = 2300^0$ bestätigt gefunden. Dagegen gilt, wie zuerst Lummer und Pringsheim[2]) feststellten, das Wiensche Gesetz V nur so lange als $\lambda \Theta$ unterhalb 0,3 cm · Grad bleibt, was allerdings für das sichtbare Gebiet bis zu den höchsten Temperaturen der Fall ist. Ebenso fanden auch Beckmann sowie Rubens und Kurlbaum[3]) für sehr lange Wellen (bis zu 50 μ) merkliche Abweichungen von der Wienschen Gleichung.

Auf Grund dieser Tatsache stellte Planck, welcher anfangs die Wiensche Gleichung zu stützen versucht hatte, sein Gesetz IV auf, das er später in theoretische Beziehung zur Thermodynamik setzte.

Das Gesetz IV ist bisher nur bis zu Temperaturen von 1600° C und bis zu Wellenlängen von 50 μ untersucht und bestätigt gefunden. Es ist jedoch anzunehmen, daß es mindestens mit sehr großer Annäherung als der mathematische Ausdruck der Kirchhoffschen Funktion H_λ gelten kann, von der Kirchhoff voraussagte, daß sie ebenso einfach sein müsse, wie alle Funktionen, die nicht von den besonderen Eigenschaften einzelner Körper abhängig sind.

Wie genau z. B. das Stefan-Boltzmannsche Gesetz durch die Versuche von Lummer und Pringsheim bestätigt wird, zeigt nebenstehende Tabelle.

Hierin bezeichnet Spalte II die auf gleiches Maß reduzierten, zu Θ (Spalte I) gehörigen Galvanometerablenkungen, welche der Größe H direkt proportional sind. In Spalte III findet sich der aus jeder Beobachtung folgende Wert von C (multipliziert mit 10^{12}), wenn man voraussetzt, daß die betreffende Beobachtung der Gleichung I folgt.

---

[1]) Wied. Ann. 58, 662 (1896).

[2]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 1, 23 und 215 (1899); 2, 163 (1900).

[3]) Berl. Ber. S. 929 (1900).

Mit dem Mittelwert der Größe C ist dann aus jeder Beobachtung nach der Gleichung

$$\Theta = \sqrt[4]{\frac{H}{C}}$$

die Temperatur Θ berechnet und in Spalte IV eingetragen. Die Zahlen der Spalte V geben die sehr geringe Differenz Beobachtung — Rechnung.

I. Abs. Temp. Θ beobachtet	II. Reduzierter Ausschlag	III. [1] $C \cdot 10^{12}$ in g-kal/sek	IV. Abs. Temp. berechnet	V. Θ beob. — Θ ber.
373,1	156	0,404	374,6	— 1,5°
492,5	638	0,395	492,0	+ 0,5
723,0	3 320	0,397	724,3	— 1,3
745,0	3 810	0,402	749,1	— 4,1
810,0	5 150	0,391	806,5	+ 3,5
868,0	6 910	0,392	867,1	+ 0,9
1378,0	44 700	0,395	1379,0	— 1
1470,0	57 400	0,392	1468,0	+ 2
1497,0	60 600	0,385	1488,0	+ 9
1535,0	67 800	0,389	1531,0	+ 4
		Mittel: 0,394		

b) Blankes Platin und andere Körper.

Lummer und Pringsheim[2]) haben außer dem schwarzen Körper auch noch *blankes Platin* untersucht. Der letztere Körper wurde gewählt, weil er von allen festen und feuerbeständigen Stoffen das geringste Absorptionsvermögen, also auch das geringste Emissionsvermögen besitzt. Bei Rotglut ist das Emissionsvermögen des Platins $^1/_{10}$, bei den höchsten Temperaturen immer noch weniger als die Hälfte desjenigen des schwarzen Körpers. Die beiden Physiker gelangten hierbei zu folgenden Gesetzen:

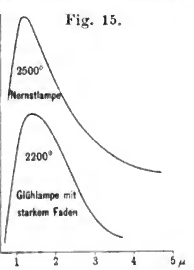


Fig. 15.

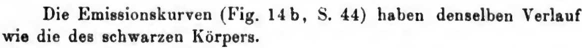
$$\eta = C' \Theta^5 \quad . \quad . \quad . \quad \text{I a}$$

$$\lambda_{max} \Theta = C_1' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{II a}$$

$$\eta_{max} = C_2' \Theta^6 \quad . \quad . \quad . \quad \text{III a}$$

wo

$$C_1' = 0{,}263 \ (\lambda \text{ in cm})$$



Die Emissionskurven (Fig. 14 b, S. 44) haben denselben Verlauf wie die des schwarzen Körpers.

[1]) Auch für diese Zahlen gilt die Fußnote 1) S. 45.
[2]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 1, 226 (1899).

Das letztere gilt auch für die Kurven einer *elektrischen Kohlenfadenlampe* und einer *Nernstlampe* (Fig. 15). Diese Kurven rühren ebenfalls von Lummer und Pringsheim her.

Für *Platin*, *Eisenoxyd*, *Kupferoxyd*, *Ruß* und *Kohle* fand Paschen [1])

$$\eta_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^\alpha \cdot e^{\frac{c_2}{\lambda \Theta}}},$$

wo c_1, c_2 und α für jeden Körper Konstante sind; z. B. ergab sich (im Gegensatz zu den einwandfreien Messungen von Lummer und Pringsheim) für

Platin	$\alpha = 5{,}54$
Kohlenruß	$\alpha = 5{,}63$

Aus dem Gesetz von Paschen folgen die drei nachstehenden:

$$\eta = \int_0^\infty \eta_\lambda \, d\lambda = C'' \Theta^{\alpha - 1}$$

$$\lambda_{max} \Theta = \frac{c_2}{\alpha} = C_1''$$

$$\eta_{max} = c_1 \left(\frac{\alpha}{c_2}\right)^\alpha e^{-\alpha} \cdot \Theta^\alpha = C_2'' \Theta^\alpha$$

Beispiele. 1. Wächst die absolute Temperatur des schwarzen Körpers von 1000 auf 2000°,

ändert sich also Θ im Verhältnis 1 : 2,
so ändert sich H „ „ $1 : 2^4 = 1 : 16$,
„ „ „ H_{max} im Verhältnis $1 : 2^5 = 1 : 32$,

während sich dabei H_{max} von

$$\lambda_{max} = \frac{0{,}294}{1000} \text{ cm} = 2{,}94\,\mu \quad \text{nach} \quad \lambda_{max} = \frac{0{,}294}{2000} \text{ cm} = 1{,}47\,\mu$$

verschiebt.

2. Für den schwarzen Körper bzw. blankes Platin ergibt sich λ_{max} nach den Verschiebungsgesetzen II und IIa

bei $\Theta =$	0	273	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000°
zu	∞	10,8	5,88	2,94	1,47	0,98	0,74	0,59	0,49 μ
bzw. zu	∞	9,6	5,26	2,63	1,32	0,88	0,66	0,53	0,44 μ

Das Maximum des Emissionsvermögens liegt also für $\Theta = 0$ im Unendlichen, für 0° C ($\Theta = 273$) bei den Wellenlängen 10,8 bzw. 9,6, für $\Theta = 2000°$ bei 1,47 bzw. 1,32 μ usw.

Bei den Temperaturen der *meisten* in der Beleuchtungstechnik gebräuchlichen Lichtquellen (etwa 1700 bis 2500° abs.) liegt für den

[1]) Wied. Ann. 58, 455 (1896) und 60, 662 (1897).

schwarzen Körper und blankes Platin, mithin auch für alle Stoffe, deren Strahlungseigenschaften zwischen denen dieser beiden Körper liegen, das maximale Emissionsvermögen weit im Ultraroten, also in dem Gebiete, für welches das Auge unempfindlich ist; es wird mithin eine ganz außerordentliche Energievergeudung getrieben. Erst bei einer Temperatur von etwa 4000° abs., der ungefähren Temperatur der Bogenlampe, rückt λ_{max} in das sichtbare Gebiet.

c) Folgerungen.

Aus den Strahlungsgesetzen des schwarzen Körpers und des blanken Platins, noch anschaulicher aus den Emissionskurven der Fig. 14a und b auf S. 44 folgt:

1. Das Emissionsvermögen für jede Wellenlänge wächst mit steigender Temperatur. Denn die Kurven schneiden einander nie; jede Kurve höherer Temperatur liegt vollständig oberhalb der Kurve tieferer Temperatur.

2. Dabei wächst das Emissionsvermögen für die kürzeren Wellen viel schneller mit der Temperatur als das für die längeren, so daß sich das maximale Emissionsvermögen nach den kürzeren Wellen verschiebt. Das Spektrum wird also mit steigender Temperatur relativ ärmer an den weniger brechbaren, dagegen relativ reicher an den stärker brechbaren Strahlen. Dies entspricht der bekannten Erscheinung, daß eine Lichtquelle um so rötlicher bzw. weißlicher aussieht, je niedriger bzw. höher ihre Temperatur ist.

3. Der größte Teil der Energie liegt in dem Gebiete der ultraroten Strahlen. Die Leuchtfläche (S. 44) ist also ein kleiner Teil der ganzen Emissionsfläche, d. h. der von der ganzen Emissionskurve und der Abszissenachse eingeschlossenen Fläche. Mit anderen Worten:

Das Emissionsvermögen für die leuchtenden Strahlen ist bei allen in den Kurven angegebenen Temperaturen ein sehr kleiner Bruchteil des Gesamtemissionsvermögens.

Oder: Das Licht ist nur ein kleiner Bruchteil des Gesamtenergiestromes (Licht + dunklem Energiestrom).

4. Dieser Bruchteil steigt mit steigender Temperatur.

§ 18. Experimentelle Bestimmung des Verhältnisses zwischen Licht und Gesamtenergiestrom.

In umstehender Tabelle sind die zum Teil sehr stark voneinander abweichenden Messungsergebnisse einer Reihe von Beobachtern zusammengestellt. Diese Abweichungen rühren zum Teil von Versuchsfehlern, zum Teil daher, daß keine festen Grenzen für die sichtbaren Strahlen bestehen.

Lichtquelle	Verhältniszahl	Beobachter
Öllampe	0,03	Tyndall[1])
Kerze	0,015	Rogers[2])
	0,020	Thomsen[3]), Hutchins[4])
Hefnerlampe	0,009	Ångström[5])
	0,024	Tumlirz[6])
Argandbrenner	0,016	Rogers[2])
	0,024	Langley[7])
Leuchtgas	0,013	Rogers[2])
	0,04	Tyndall[1])
Elektrische Kohlenfadenlampe je nach der Beanspruchung	0,02 bis 0,07	Merritt[8])
Nernstlampe	0,045	Ingersoll[9])
Acetylen	0,055	Ångström[5])
	0,105 bzw. 0,039	Nichols, Stewart und Hoxie bzw. Stewart[10])
Bogenlampe je nach dem Charakter der Kohle	0,08 bis 0,13	Marks[11])
	0,10 bis 0,17	Nakano[12])
Magnesiumlicht	0,137	Rogers[2])
Sonnenlicht	0,35	Langley
Quecksilberlichtbogen	0,41 bis 0,48	Geer[13])

Von den hierbei benutzten Methoden seien die folgenden erwähnt:

a) (Langley.) Man untersucht das Spektrum der Lichtquelle mittels Bolometers oder eines anderen objektiven Strahlungsmessers, konstruiert die Emissionskurve (S. 43) und berechnet das Verhältnis der Leuchtfläche zur gesamten Emissionsfläche.

b) (Tyndall.) Man läßt die Strahlen einmal direkt, das andere Mal, nachdem sie eine Jodlösung in Schwefelkohlenstoff (S. 22) passiert haben, auf den Strahlungsmesser fallen. Diese auf eine Subtraktion hinauslaufende Methode ist nur geeignet, wenn die gesuchte Verhältniszahl relativ groß ist.

[1]) Pogg. Ann. **124**, 36 (1865).
[2]) Sill. J. (3) **43**, 301 (1892).
[3]) Pogg. Ann. **125**, 348 (1865).
[4]) Sill. J. (3) **39**, 392 (1890).
[5]) Phys. Z. **3**, 257 (1901/1902).
[6]) Wied. Ann. **38**, 640 (1889).
[7]) Science **1**, 483 (1883).
[8]) Sill. J. (3) **37**, 167 (1889).
[9]) Phys. Review **17**, 371 (1903).
[10]) Ebenda **11**, 215 (1900); **13**, 257 (1901); bzw. **16**, 123 (1903).
[11]) Trans. Amer. Inst. Electr. Eng. **7**, 175 (1890).
[12]) Ebenda **6**, 308 (1889).
[13]) Electr. World **41**, 353 (1903). Phys. Review **16**, 94 (1903).

c) (Melloni.) Man ersetzt die Jodlösung durch destilliertes Wasser oder eine Alaunlösung in Wasser (S. 22). Diese Methode gibt nur in Verbindung mit b) zuverlässige Werte. Es sind hier noch zwei Korrektionen anzubringen. Die eine rührt daher, daß die Flüssigkeiten einen Teil des Lichtes reflektieren und absorbieren; sie wird photometrisch (Merritt, Rogers) oder rechnerisch (Tumlirz) bestimmt. Die andere Korrektion rührt daher, daß die Flüssigkeiten die dunkle Wärme nicht ganz absorbieren. Zu ihrer Bestimmung läßt man die Strahlen, welche die Flüssigkeit durchsetzt haben, noch durch eine Jodlösung in Schwefelkohlenstoff hindurchgehen.

d) (Ångström.) Man erzeugt ein Spektrum und vereinigt die Lichtstrahlen, nach Abblendung der unsichtbaren Strahlen, wieder durch eine Zylinderlinse.

§ 19. Experimentelle Bestimmung des physikalischen Wirkungsgrades einer Lichtquelle.

Die zur Unterhaltung des Leuchtens verbrauchte Energie Q teilt sich in drei Teile, nämlich in

1. die nach allen Seiten (den Raumwinkel 4π) ausgestrahlte Lichtmenge G_l,

2. den nach allen Seiten ausgestrahlten dunklen Energiestrom G_d,

3. die Wärmemenge Q_c, welche durch Leitung und Konvektion für die Strahlung verloren geht;

demnach ist

$$Q = G_l + G_d + Q_c.$$

Wir wollen dann unter dem *physikalischen Wirkungsgrad* die Größe

$$G_l / Q$$

verstehen, wobei sich natürlich G_l und Q auf dieselbe Zeit beziehen.

Von dem vorliegenden Beobachtungsmaterial mögen die in umstehender Tabelle mitgeteilten Zahlen herausgegriffen werden.

Während der Drucklegung hat Wedding[1]) umfangreiche Untersuchungen über diesen Gegenstand veröffentlicht, auf welche hiermit hingewiesen werden möge.

Bei den für die Tabelle benutzten Versuchen wurden die beiden folgenden Methoden benutzt, je nachdem es sich um Flammen oder elektrische Lichtquellen handelte.

a) (Thomsen, Nichols, Rogers.) Man bestimmt zunächst den ganzen Energiestrom $G = G_l + G_d$ mittels Bolometers oder eines anderen objektiven Energiemessers in absolutem Maße (S. 25) und erhält daraus G_l durch Multiplikation mit der im vorigen Paragraphen an-

[1]) J. f. G. u. W. **48**, 1 (1905).

gegebenen Verhältniszahl. Q wird aus der Verbrennungswärme des Leuchtmaterials bestimmt.

Lichtquelle	Physikalischer Wirkungsgrad	Beobachter
Englische Kerze	0,003	Thomsen [1])
Acetylen	0,024	Nichols [1])
Elektrische Kohlenfadenlampe bei normaler Beanspruchung	0,055	R. v. Helmholtz [2])
	0,054	Merritt [1])
Magnesiumlicht	0,102	Rogers [1])
Geißlersche Röhre	0,33	Staub [3])

So erzeugt nach Thomsen z. B. eine englische Kerze, welche 8,2 g in der Stunde verbraucht, in der Minute eine Verbrennungsenergie $Q = 1400$ g-kal. und strahlt in derselben Zeit im ganzen einen Energiestrom $G = 210$ g-kal. aus, wovon jedoch nur 2 Proz. in leuchtende Strahlen umgesetzt werden. Demnach ist der Wirkungsgrad

$$\frac{210 \cdot 0{,}02}{1400} = 0{,}003\,;$$

d. h. nur 0,3 Proz. der im Kerzenmaterial enthaltenen Verbrennungsenergie werden zur Beleuchtung ausgenutzt.

b) (Merritt, Helmholtz, Staub.) Man bestimmt G_l [4]) mittels einer kalorimetrischen Methode in absolutem Maße (vgl. S. 25); man bestimmt Q ebenso oder durch elektrische Messungen.

Die für die *elektrische Kohlenfadenlampe* gefundenen Zahlen stimmen ungefähr mit der entsprechenden, im vorigen Paragraphen angegebenen Maximalzahl 0,07 überein. Hieraus ist ersichtlich, daß bei dieser Lampe ein großer Bruchteil der zugeführten elektrischen Energie in strahlende umgewandelt wird. Nach direkten Messungen von R. v. Helmholtz beträgt dieser Bruchteil 0,75, so daß 25 Proz. durch Leitung und Konvektion verloren gehen. Bei *Flammen* ist dieser Verlust viel größer.

§ 20. Das sog. mechanische Äquivalent der Lichteinheit.

Hiermit bezeichnet man, wenn auch nicht einwandfrei (S. 101), die in absolutem Maße ausgedrückte horizontale Strahlungsstärke U_l der Lichtstrahlen der in der praktischen Photometrie benutzten Einheitslampe (S. 103). Da diese Größe sehr klein ist, bestimmt

[1]) Literatur s. S. 50.

[2]) Die Licht- und Wärmestrahlung verbrennender Gase. Berlin, Leonhard Simion, 1890.

[3]) Beibl. d. Ann. 14, 538 (1890). Inaug. Diss. Zürich 1890.

[4]) Merritts Messungen mit der Thermosäule sind nicht einwandfrei, da der Verlust durch Konvektion und Leitung vernachlässigt wurde.

man zunächst die horizontale Strahlungsstärke U der gesamten Strahlen (Gesamtstrahlungsstärke) und findet sodann

$$U_l = k\,U,$$

wo k die in § 18 besprochene Verhältniszahl bezeichnet.

Über diesen Gegenstand liegen nur wenige, ebenfalls sehr voneinander abweichende Messungen vor. Es fanden:

Thomsen[1])	für die englische Kerze . . .	$U_l =$ 0,0056[2])	g-kal./sek.
Hutchins[1])	„ „ „ „	0,0047	„
Tumlirz[1])	„ „ Hefnerlampe	0,0036	„
Ångström[1])	„ „ „	0,0019	„

Die Zahl von Ångström ist die zuverlässigste.

Steht der Flamme der Hefnerlampe in der Entfernung von 1 m eine vertikale Fläche s von 1 qcm Inhalt so gegenüber, daß die Normale der Fläche durch die Flammenmitte hindurchgeht, so ist nach Tumlirz, der diese Rechnung zuerst durchführte, der auf s in jeder Sekunde auffallende Energiestrom der leuchtenden Strahlen

$$0{,}000\,000\,36 \text{ g-kal.} = 3{,}6 \cdot 10^{-7} \text{ g-kal.}$$

Ein in s befindliches Auge, dessen Pupillenöffnung 3 mm beträgt, empfängt also in jeder Sekunde den sichtbaren Energiestrom

$$2{,}55 \cdot 10^{-8} \text{ g-kal.} = 1{,}07 \text{ Erg},$$

welcher erst nach Ablauf von 1 Jahr und 89 Tagen 1 g Wasser um 1° erhöhen könnte. Nach den Messungen von Ångström würde dieser Energiestrom sogar nur halb so groß sein. Hierdurch erhält man eine Vorstellung von der außerordentlich großen Empfindlichkeit des Auges für Lichtstrahlen.

§ 21. Ziele der Leuchttechnik.

Unter diesem Titel hat Lummer[3]) im Elektrotechnischen Verein zu Berlin einen populären und dabei doch streng wissenschaftlichen Experimentalvortrag gehalten, welcher die Grundlehren der Lichterzeugung, insbesondere die Strahlungsgesetze, sowie alle für die Beleuchtungstechnik in Betracht kommenden Fragen ausführlich behandelt. Auch Pringsheim[4]) sprach in der Chemischen Gesellschaft zu Breslau über diesen Gegenstand. Wir werden hier im wesentlichen den Ausführungen beider Physiker folgen.

---

[1]) Literatur s. S. 50. Neuerdings findet Tumlirz [Wien. Ber. **112** (2a), 1382 (1903)] für U einen um 10 Proz. größeren Wert.

[2]) Von Tumlirz berechnet.

[3]) E. T. Z. **23**, 787 (1902); J. f. G. u. W. **46**, 281 (1903); beträchtlich erweitert in Buchform erschienen bei Oldenbourg, Berlin und München 1903; vgl. auch Z. f. Bel. **10**, 1 (1904).

[4]) Grunerts Archiv der Mathem. u. Phys. (3) **7**, 236 (1903).

Der Zweck unserer Lichtquellen ist der, möglichst viel sichtbare Energie (Licht) zu spenden. Die dabei ausgestrahlte unsichtbare Energie ist nur ein unnötiger, oft lästiger Ballast. Eine Lichtquelle ist also um so zweckentsprechender, je größer das Verhältnis k zwischen Licht und Gesamtenergiestrom ist, ferner je weniger Wärme durch Leitung und Konvektion verloren geht. Den letzteren Verlust kann man, wie die elektrische Kohlenfadenlampe zeigt, z. B. dadurch auf ein Mindestmaß zurückführen, daß man einen Glühkörper im Vakuum durch einen elektrischen Strom zum Leuchten bringt. Dagegen ist die Verhältniszahl k, wie die Tabelle auf S. 50 zeigt, nicht allein bei den elektrischen Glühlampen, sondern auch bei allen unseren gebräuchlichen, auf Temperaturstrahlung beruhenden Lichtquellen klein. Das Ziel der Beleuchtungstechnik muß also, wenn wir zunächst bei der Temperaturstrahlung stehen bleiben, dahin gerichtet sein, *die Zahl k zu vergrößern.* Hierzu bieten sich die beiden nachstehend mit a) und b) bezeichneten Wege.

a) Auswahl der leuchtenden Substanz.

Der schwarze Körper gibt von allen gleichtemperierten Temperaturstrahlern das meiste Licht; dennoch ist er sehr unökonomisch, weil er gleichzeitig die meiste dunkle Wärme aussendet. Für die Beleuchtungstechnik günstiger sind alle die *Stoffe*, welche im Vergleiche zum Licht nur wenig dunkle Wärme ausstrahlen, d. h. welche die Lichtwellen weit stärker als die ultraroten Wellen absorbieren (S. 40). Nach Pringsheim sind Platin, der Kohlen- und Osmiumfaden Stoffe, welche, wenn auch in schwachem Maße, selektive Eigenschaften besitzen.

Die günstigsten Stoffe sind diejenigen, welche *nur* Licht aussenden. Würde es z. B. gelingen, einen Stoff zu finden, welcher ebenso stark wie der Kohlenfaden leuchtet, ohne gleichzeitig dunkle Wärme zu liefern, so würden die Kosten für die Beleuchtung mindestens 10 mal so klein wie jetzt werden. Der geeignetste von allen diesen selektiv absorbierenden Körpern würde nach Lummer der von ihm als *idealer Temperaturstrahler* (S. 40) bezeichnete sein. Hierbei ist vorausgesetzt, daß der Leuchtstoff für die Zwecke der Praxis den beiden folgenden Bedingungen zu genügen hat: 1. er muß bei jeder Temperatur möglichst stark leuchten; 2. sein Licht muß einen dem Auge angenehmen Farbenton besitzen, also eine dem Tageslichte möglichst nahe kommende spektrale Zusammensetzung haben. Läßt man dagegen die beiden letzteren Bedingungen fallen, so würden vom *rein photometrischen Standpunkte* aus von allen selektiv absorbierenden Temperaturstrahlern diejenigen die besten sein, welche hauptsächlich *gelbgrüne* Strahlen aussenden, weil diese am stärksten auf das Auge wirken (S. 65).

b) Erhöhung der Temperatur.

Die Verhältniszahl k können wir, wie wir auf S. 49 sahen, auch durch *Erhöhung der Temperatur* steigern, und zwar wächst, wie die Strahlungsgesetze § 17 zeigen, das Emissionsvermögen η_λ für jede sichtbare Welle ganz bedeutend mit der Temperatur; z. B. verdoppelt sich η_λ beim schwarzen Körper für die Wellenlänge $\lambda = 0{,}589$ (gelbe Natriumlinie), wenn sich die Temperatur von 1800° auf 1875° abs., d. h. um nur 4 Proz. erhöht. Infolgedessen nimmt auch die Wirkung der gesamten Lichtstrahlen auf das Auge, wie in § 37 gezeigt wird, außerordentlich schnell mit der Temperatur Θ zu, z. B. für $\Theta = 1900°$ abs. mit der 14. Potenz von Θ. Eine kleine Temperaturerhöhung bedeutet also eine wesentliche Verbesserung des Leuchteffektes. Hierauf beruht der Vorzug des Bogenlichtes vor dem elekrischen Glühlichte, des Gasglühlichtes vor dem gewöhnlichen Gaslichte. Den enormen Einfluß der Temperatur zeigte Lummer in dem oben erwähnten Experimentalvortrage an einer Glühlampe, welche bei 45 Volt und 1,3 Ampere normal brennt und dann eine Temperatur von etwa 2000° abs. besitzt. Wenn man die Spannung dieser Lampe von 45 auf 95 Volt erhöht, so daß die Stromstärke auf 3 Ampere und die absolute Temperatur auf etwa 3000° anwächst, so leuchtet nach Lummer die Lampe schätzungsweise 130 mal[1]) so hell wie vorher, während die entsprechende elektrische Energie nur etwa auf das Fünffache steigt. Leider aber zerspratzt die Kohle bald, weil sie *diese Temperatur nicht aushalten kann*, so daß die Lampe erlischt. Die Beleuchtungstechniker haben also dahin zu streben, *temperaturbeständige* Körper zu finden und diese auf eine *möglichst hohe Temperatur* zu erhitzen. Nach Lummer und Pringsheim ist die Nernstlampe ein erster Schritt auf diesem aussichtsvollen Wege.

c) Lumineszenz.

Noch aussichtsreicher ist der Weg, anstatt der Temperaturstrahlung zur Lichterzeugung Lumineszenzerscheinungen zu benutzen, bei denen die Energie der Strahlung häufig nur auf einen kleinen Spektralbezirk beschränkt ist. Ein erster Schritt in dieser Richtung ist mit der Flammenbogenlampe getan, bei der die elektrisch lumineszierenden Gase wenigstens einen Teil des Lichteffektes hergeben.

[1]) Diese Zahl ist entschieden viel zu groß, da angenommen wird, daß sich für hohe Temperaturen die physiologische Wirkung (Lichtstärke) stets mit der zwölften Potenz der absoluten Temperatur ändert (vgl. S. 97 und die Tabelle auf S. 99).

Drittes Kapitel.

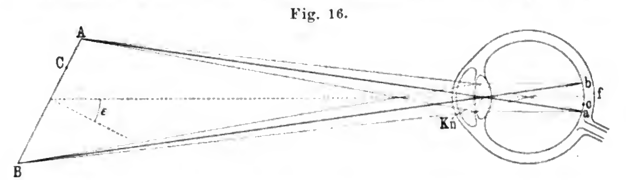
Photometrische Grundlagen.

A. Physiologische Wirkung der Lichtstrahlen auf das Auge.

§ 22. Das Auge als optischer Apparat.

Das Auge wirkt wie eine camera obscura. Es entwirft mittels vier brechender Medien, nämlich der Hornhaut, der Kristallinse, der zwischen beiden liegenden wässerigen Feuchtigkeit und dem jenseits der Linse liegenden Glaskörper vom Gegenstande *AB* (Fig. 16) ein

Fig. 16.



umgekehrtes verkleinertes Bild *ab* auf der Netzhaut. Als Blende wirkt hierbei die vor der Kristallinse liegende Regenbogenhaut (Iris), welche eine kreisförmige, Pupille genannte Öffnung besitzt, die sich zur Regelung der ins Auge dringenden Lichtmenge nach Bedürfnis verengern oder erweitern kann. Die eben genannten vier brechenden Medien sind an den wirksamen Stellen nahezu kugelförmig und zwar derart, daß die Mittelpunkte dieser Kugeln auf derselben Geraden, der optischen Achse des Auges, liegen. Das Auge ist also ein optisches System zentrierter Flächen und besitzt als solches zwei Knotenpunkte. Die letzteren liegen hier aber so nahe beieinander, daß man sie sich in einem Punkte *Kn* vereinigt denken kann. Derselbe liegt nahe an der hinteren Fläche der Linse und ist von der Netzhaut etwa 15 mm entfernt. Man erhält mithin das Bild eines Punktes *C* der Fläche *AB* als denjenigen Punkt *c*, in welchem die Verbindungslinie von *C* mit *Kn* die Netzhaut schneidet (Listings reduziertes Auge).

§ 23. Die Netzhaut als lichtempfindliche Schicht.

Die Netzhaut ist eine dünne membranartige Ausbreitung der in Form eines dicken Bündels die Sehnen- und Aderhaut durchdringenden

Sehnervenmasse. Der zum Sehen wichtigste Teil der Netzhaut ist der nicht ganz in ihrer Mitte, sondern etwas nach der Schläfe gelegene *gelbe Fleck* (macula lutea), in dessen Mitte sich die dünne, etwas vertiefte *Netzhautgrube* (fovea centralis) *f* (Fig. 16) befindet. Diese ist die Stelle feinster Raumunterscheidung. Auf ihr wird das Bild desjenigen Gegenstandes entworfen, den das Auge fixiert. Die eigentliche lichtempfindliche Schicht der Netzhaut, in welcher die von außen kommende Energie den Sehnerven reizt, sind die *Stäbchen* und *Zapfen*, welche, an der hinteren Seite der Netzhaut die Enden der Nervenleitung ausmachend, ein regelmäßiges Mosaik bilden. In der Netzhautgrube befinden sich nur Zapfen. Auf den übrigen (peripherischen) Stellen der Netzhaut kommen beide Elemente vor und zwar derart, daß sich nach dem Rande zu mehr Stäbchen als Zapfen befinden. Die Außenglieder der Stäbchen enthalten den von Boll entdeckten Sehpurpur, welcher sich durch die Lichteinwirkung zu Sehgelb zersetzt und sich im Dunklen regeneriert. Dagegen kommt, wie Kühne fand, in allen Zapfen, also auch in der fovea centralis, kein Sehpurpur vor.

Die Stäbchen sitzen zu vielen gemeinschaftlich an einer Nervenfaser, während den Zapfen, wenigstens denjenigen der fovea centralis, je eine besondere Leitung zukommt. Schätzungsweise besitzen wir im ganzen 113 Millionen Stäbchen und 7 Millionen Zapfen (davon 4000 auf der fovea centralis und 8000 bis 13 000 auf der macula lutea), während allen diesen Elementen nur 1 Million Nervenleitungen zukommen, welche bündelweise, dabei einzeln voneinander isoliert, zu einem Kabel verschnürt, dem Gehirn die Lichtmeldungen übermitteln.

§ 24. Die Empfindung des Lichtes. Helligkeit.

Wie auf S. 50 gezeigt wurde, ist das Verhältnis zwischen dem Energiestrom der leuchtenden Strahlen und dem aller Strahlen von Körper zu Körper verschieden. Man darf deshalb zum Vergleich der leuchtenden Wirkungen zweier Lichtquellen nicht die gesamten Energieströme beider Lichtquellen in Betracht ziehen. Aber man darf für gewöhnlich nicht einmal die Energieströme der leuchtenden Strahlen vergleichen; denn der Energiestrom, welchen wir mit dem *Auge* empfinden, ist, wie jetzt gezeigt werden soll, ein ganz anderer als der mittels empfindlicher *physikalischer Apparate* zu messende sichtbare Energiestrom.

Wir wollen hierbei wieder von der leuchtenden Fläche AB (Fig. 16) ausgehen, welche wir als sehr klein annehmen wollen; in der Figur ist sie der größeren Deutlichkeit wegen viel zu groß gezeichnet. Die Strahlen, welche AB zum Auge entsendet, fallen teils auf die weiße Haut, welche sie diffus reflektiert, teils dringen sie durch

die Hornhaut ins Auge. Von diesen fallen die äußeren auf die Regenbogenhaut, welche sie ebenfalls nach allen Seiten zerstreut und dadurch in ihrer spezifischen Farbe sichtbar wird. Dagegen dringen die zentralen Strahlen durch die Pupille weiter ins Innere des Auges. Von den letzteren Strahlen vermögen nur diejenigen, welche eine kleinere Wellenlänge als 0,812 μ (S. 12) haben, also die leuchtenden Strahlen im weiteren Sinne, die Netzhaut zu reizen; die langwelligeren Strahlen werden nach Helmholtz vollständig von den Augenmedien absorbiert, so daß sie gar nicht zur Netzhaut gelangen, während nach anderen Forschern noch ein Teil der ultraroten Strahlen, z. B. nach Aschkinass[1]) noch solche von 1,4 μ Länge, auf die Netzhaut auftreffen, aber durch irgend welche Absorptionen für die Lichtwirkung verloren gehen. Die Vorgänge, welche durch die leuchtenden Strahlen auf der Netzhaut veranlaßt werden, sind noch wenig aufgeklärt. In jedem Falle steht fest, daß nur ein *Bruchteil K* der Energie, welche die Lichtstrahlen mit sich führen, unter gleichzeitigen Änderungen in der Substanz der Netzhaut — z. B.[2]) Bleichen des Sehpurpurs, Bewegung der Pigmentkörnchen in dem Pigment-Epithel, Erzeugung von elektrischen Strömen — die lichtempfindlichen Netzhautelemente, nämlich die Stäbchen und Zapfen erregt. Man nimmt nun allgemein an, daß gerade *dieser Bruchteil K* von den Stäbchen und Zapfen *absorbiert* (S. 16 und 23 unten) und in diejenige uns noch unbekannte *Energieform* übergeführt wird, welche durch Vermittelung der Nervenleitungen im Gehirn die *Lichtempfindung* veranlaßt[3]). Wir haben also jetzt zu unterscheiden zwischen

a) dem die Pupille treffenden Energiestrom G der gesamten Ätherschwingungen;

b) dem die Pupille treffenden und von hier zur Netzhaut weitergehenden Energiestrom G_l der leuchtenden Ätherschwingungen, welcher die Netzhaut reizt und als Licht (vgl. S. 1) bezeichnet wird;

c) dem uns unbekannten Bruchteile K_l des Energiestromes G_l, welcher von den Netzhautelementen absorbiert wird und dadurch eine Lichtempfindung erweckt. Dieser Anteil werde mit Φ_l bezeichnet, so daß wir setzen können

$$\Phi_l = K_l G_l \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

Φ_l werde die *physiologische Energie*, K_l der *physiologische Proportionalitätsfaktor* oder, unter Zugrundelegung der Absorptionshypothese, das *physiologische Absorptionsvermögen* genannt.

Den Größen G, K und Φ ist der Index l hinzugefügt worden; es soll hiermit der allgemeine Fall angedeutet werden, daß wir es mit

---

[1]) Wied. Ann. 55, 401 (1895).

[2]) Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik. Zweite Auflage. Leopold Voß, Hamburg und Leipzig 1896, S. 265.

[3]) Vgl. z. B. Langley (S. 63); Broca, J. d. Phys. (3) 3, 206 (1894).

gemischtem Lichte zu tun haben. Dagegen soll sich der Index λ auf homogenes Licht von der Wellenlänge λ beziehen. Im folgenden soll also beispielsweise bezeichnen:

η_l das Emissionsvermögen für gemischtes Licht;

K_λ das physiologische Absorptionsvermögen für die Wellenlänge λ.

Man nimmt ferner allgemein an, daß zwei kleine sehr nahe Flächen AB und $A'B'$ dem Auge *gleich hell* erscheinen, wenn auf gleich großen Flächen ihrer Netzhautbilder [1]) die *gleiche physiologische Energie* erzeugt wird. Man definiert dementsprechend die *Helligkeit* der kleinen Fläche AB als die auf die Einheit der Netzhaut kommende physiologische Energie oder, was dasselbe ist, als das Verhältnis der auf dem Netzhautbilde ab erzeugten physiologischen Energie Φ_l und der Größe p des Netzhautbildes, also

$$h_l = \frac{\Phi_l}{p} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

oder nach Gleichung 1)

$$h_l = \frac{K_l\, G_l}{p} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

Analog wollen wir unter absoluter Helligkeit $\mathfrak{H}$ den auf die Einheit der Netzhaut fallenden Energiestrom der Lichtstrahlen, also die Größe verstehen

$$\mathfrak{H}_l = \frac{G_l}{p} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 4)$$

$\mathfrak{H}_l$ würde dieser Definition gemäß also die Helligkeit von AB sein, wenn die Netzhaut ein vollkommener Energiemesser für den auf sie auffallenden Energiestrom der Lichtstrahlen wäre, d. h. den ganzen Energiebetrag zur Erweckung einer Lichtempfindung absorbieren würde.

Mit Rücksicht auf Gleichung 4) geht Gleichung 3) über in

$$h_l = K_l\, \mathfrak{H}_l \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 5)$$

Es sei nun (Fig. 16)

r der Abstand von der Mitte von AB bis zur Mitte der Pupille (genauer bis zur Mitte des von der vorderen Augenkammer und der Hornhaut entworfenen Pupillenbildes);

s die gegen r sehr kleine Größe der Pupille;

ε der Winkel zwischen dem Lot auf AB und der Richtung r (Ausstrahlungswinkel);

η_l das Emissionsvermögen von AB ($= \sigma$) unter dem Ausstrahlungswinkel ε;

r_1 der Abstand zwischen dem Knotenpunkt des Auges und AB;

d der Abstand zwischen Knotenpunkt und Netzhaut.

[1]) Diese beiden Netzhautbilder liegen dann also *sehr nahe* beieinander; diese Bedingung muß hier erfüllt sein, weil die Netzhaut an verschiedenen Stellen verschieden empfindlich ist.

Alsdann ist nach Gleichung 3), S. 33

$$G_l = \frac{\eta_l \sigma s \cos \varepsilon}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 6)$$

da beim direkten Sehen die Pupille nahezu [1]) senkrecht zur Sehrichtung r steht, also nahezu $i = 0$ ist; denn die fovea centralis liegt sehr nahe der Augenachse (S. 57). Nun liegen die Begrenzungen des Gegenstandes AB und seines Netzhautbildes ab auf zwei Scheitelkegeln, deren Spitze der Knotenpunkt Kn ist. Beschreibt man um den letzteren eine Kugel mit dem Radius r_1, so schneidet aus dieser Kugel der AB umschließende Kegel — der räumliche Winkel, unter welchem AB von Kn aus erscheint — die Fläche $\sigma \cos \varepsilon$ heraus, welche dem Netzhautbilde von AB ähnlich ist. Es ist also

$$\sigma \cos \varepsilon : p = r_1^2 : d^2,$$

woraus sich, da für die in Betracht kommenden großen Entfernungen r nahezu gleich r_1 ist, ergibt:

$$p = \frac{\sigma \cos \varepsilon}{r^2} \cdot d^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 7)$$

Nach Gleichungen 4), 6) und 7) ist also

$$\mathfrak{H}_l = \frac{\eta_l s}{d^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

so daß nach Gleichung 5)

$$h_l = K_l \eta_l \cdot \frac{s}{d^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 9)$$

Das Auge möge jetzt in der *gleichen Sehrichtung* ε, aber aus einer *anderen Entfernung* r' auf AB blicken. In diesem Falle sei das Verhältnis zwischen der physiologischen Energie und dem Energiestrom der leuchtenden Strahlen gleich K_l'. Alsdann ist die Helligkeit

$$h_l' = K_l' \eta_l \cdot \frac{s}{d^2}.$$

Nun lehrt der Versuch, daß eine Fläche AB in der gleichen Sehrichtung, aber aus verschiedenen Entfernungen betrachtet, bei gleicher Pupillenöffnung s gleich hell erscheint, daß also $h_l = h_l'$ ist; demzufolge ist

$$K_l = K_l' \quad \ldots \ldots \ldots \quad 10)$$

Ist AB *selbstleuchtend*, so ist η_l bei Temperaturstrahlern eine Funktion der Temperatur und des Absorptionsvermögens [S. 83, Anm. 2)]. Wenn AB nicht selbstleuchtend ist, sondern, wie es bei den Photometerschirmen der Fall ist, von einer Lichtquelle L *beleuchtet* wird, so ist η_l der von L auf AB erzeugten Bestrahlung B_l proportional, also

$$\eta_l = m B_l,$$

wo m eine gewisse Größe ist (vgl. S. 37, 78 und 79).

In diesem Falle ist also nach Gleichung 8)

$$\mathfrak{H}_l = \frac{m B_l s}{d^2} \quad \text{. . . . . 11)}$$

und nach Gleichung 9)

$$h_l = \frac{m K_l B_l s}{d^2} \quad \text{. . . . . 12)}$$

Folgerung.

1. Die absolute Helligkeit $\mathfrak{H}_l$ ist allgemein dem Emissionsvermögen η_l von AB und in dem speziellen Falle, daß AB beleuchtet wird, der auf AB erzeugten Bestrahlung B_l proportional.

2. Die Helligkeit h_l ist proportional $K_l \eta_l$ bzw. $K_l B_l$. Über die relative Größe des physiologischen Faktors K_l geben uns die folgenden Paragraphen, welche sich auf homogenes Licht beziehen und in welchen daher zu K der Index λ hinzugefügt ist, einen Anhalt.

§ 25. Purkinjesches Phänomen [1]).

Wenn uns zwei verschieden gefärbte beleuchtete Felder bei geringer absoluter Helligkeit, also bei geringer Bestrahlung B, gleich hell erscheinen, so ist dies nicht mehr der Fall, sobald wir die Bestrahlung, etwa durch Nähern oder Entfernen der Lichtquellen, in demselben Verhältnis ändern, und zwar ändert sich dabei das von dem langwelligeren Lichte beleuchtete Feld am meisten in seiner Helligkeit. Sind die ursprünglich gleich hell erscheinenden Felder z. B. rot und blau, so erscheint das rote Feld bei gesteigerter Bestrahlung heller, bei verminderter Bestrahlung dagegen dunkler; im letzteren Falle sieht man also das blaue Feld heller.

Würde das Purkinjesche Phänomen für alle Helligkeitsgrade bestehen, so würde eine Vergleichung verschiedenfarbigen Lichtes, welche an und für sich schon mit großen Schwierigkeiten verknüpft ist (§ 102), ganz unmöglich sein. Glücklicherweise besteht, wie Brodhun [2]) durch spektralphotometrische Untersuchungen zuerst nachgewiesen hat, dieses Phänomen *nicht mehr* oder doch nur noch in sehr geringem Maße, sobald die Helligkeit einen gewissen Betrag überschritten hat, d. h. zwei an dieser *oberen Grenze* gleich hell erscheinende Felder bleiben auch gleich hell, wenn man die absolute Helligkeit derselben in demselben Verhältnis vergrößert.

A. König [3]) hat unter Mitwirkung von mehreren Personen mit verschiedenen Farbensystemen die Helligkeitsverteilung im normalen

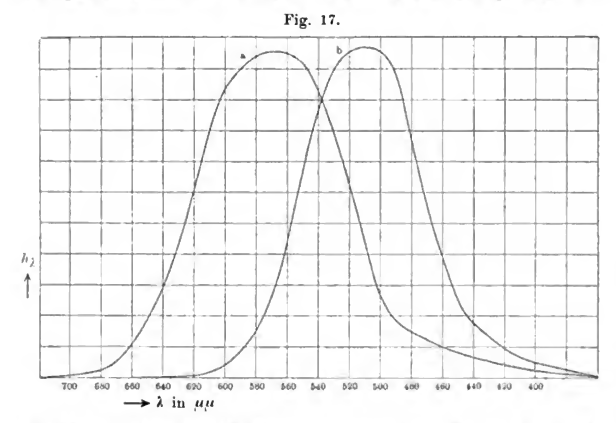
[1]) Purkinje, Zur Psychologie der Sinne 2, 109. Prag 1825.

[2]) Inaug. Diss. Berlin 1887.

[3]) Beiträge zur Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. Leopold Voß, Hamburg 1891 — Gesammelte Abhandlungen zur Physiologischen Optik von Arthur König. Mit einem Vorworte von Th. W. Engelmann. Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1903, S. 144.

Sonnenspektrum untersucht und die Ergebnisse in Kurven zusammengestellt, in welchen die Abszissen die Wellenlängen λ in $\mu\mu$ und die Ordinaten die Helligkeiten h_λ bezeichnen. Fig. 17 enthält die für das normale (farbentüchtige) Auge Königs gültigen Kurven für die beiden extremsten Fälle, und zwar bezieht sich Kurve *a* auf die höchste Helligkeitsstufe, bei welcher das Purkinjesche Phänomen sicher nicht mehr auftritt, Kurve *b* dagegen auf die niedrigste zur Messung noch benutzbare Helligkeitsstufe. In Kurve *a* liegt das Maximum der Helligkeit im Gelbgrünen bei der Wellenlänge $\lambda = 570\,\mu\mu$. Wenn man die absolute Helligkeit des Spektrums, etwa durch Verengerung des Spaltes, allmählich verringert, verschiebt sich zufolge des Pur-

Fig. 17.



kinjeschen Phänomens das Maximum immer mehr nach dem violetten Ende; bei der Kurve *b* liegt es im Blaugrünen bei $\lambda = 510\,\mu\mu$.

Bemerkt möge hierbei noch werden, daß sich bei den größeren Helligkeitsstufen erhebliche Verschiedenheiten zwischen den einzelnen Beobachtern zeigten (vgl. Langleys Tabelle, S. 64), während bei der niedrigsten Helligkeitsstufe die individuellen Verschiedenheiten nur gering waren.

Schon Macé de Lépinay und Nicati[1]) hatten gezeigt, daß das Phänomen für Flächen, die unter einem Winkel von weniger als 45′ gesehen werden, überhaupt nicht eintritt. Bei größeren Flächen haben sie ein Aufhören des Phänomens für eine obere Helligkeitsgrenze nicht beobachtet; diese Untersuchungen sind jedoch nicht vollständig zuverlässig, weil eine rechnerische Methode angewendet wurde, welche

[1]) Ann. Chim. Phys. (5) **24**, 289 (1881) und (5) **30**, 145 (1883).

direkte Anwendbarkeit des Weber-Fechnerschen Gesetzes (§ 73) für alle Helligkeiten und Farben voraussetzt. Für die praktische Photometrie hat nur die Beobachtung Brodhuns Interesse, da man nur *große Flächen* als Vergleichsfelder (§ 74) nimmt.

Folgerung.

Das Absorptionsvermögen K_λ (S. 59) ändert sich, so lange die absolute Helligkeit $\mathfrak{H}_\lambda$ unterhalb einer gewissen Grenze $\mathfrak{H}'_\lambda$ liegt, mit $\mathfrak{H}_\lambda$; K_λ wird (wenigstens für den augenblicklichen Zustand des Auges) für jede Wellenlänge konstant, sobald $\mathfrak{H}_\lambda$ den Wert $\mathfrak{H}'_\lambda$ überschritten hat.

Wird oberhalb dieser Grenze der Energiestrom G_λ verdoppelt, so wird auch der physiologische Energiestrom Φ_λ verdoppelt.

§ 26. Empfindlichkeit des Auges für Licht verschiedener Wellenlängen.

a) Bolometrische und photometrische Messungen des Sonnenspektrums führten Langley [1]) zu den in umstehender Tabelle I mitgeteilten Werten. Hierin bedeuten in willkürlichem Maße für das normale Spektrum:

$G_\lambda d\lambda$ den Energiestrom, welcher zwischen den Wellenlängen λ und $\lambda + d\lambda$ liegt;

h_λ die Helligkeit dieses Spektralbezirkes.

Die Größen h_λ wurden von vier verschiedenen mit den Anfangsbuchstaben *S. P. L.*, *F. W. V.* usw. bezeichneten Beobachtern nach der Sehschärfenmethode [2]) (vgl. § 107 bis 109) gefunden, und zwar sind für jeden Beobachter die Einzelwerte und die aus ihnen berechneten Mittelwerte angegeben. Aus diesen Mittelwerten sind sodann für die drei letzten Beobachter (die Werte des ersten Beobachters wurden fortgelassen, weil sie herausfallen) die Größen h_λ/G_λ und aus diesen durch Mittelbildung die in der letzten Horizontalreihe stehenden Zahlen bestimmt. Diese letzteren Zahlen geben also in relativem Maße die Helligkeiten an, welche durch *gleiche* Energiebeträge verschiedener Wellenlängen hervorgerufen werden. Sie geben also ein relatives Maß für die Empfindlichkeit des Auges für die verschiedenen Farben.

Aus den Zahlen der letzten Horizontalspalte in Tabelle I sind die der Tabelle II auf S. 65 abgeleitet, welche man gewöhnlich in Abhandlungen angegeben findet.

---

[1]) Sill. J. (3) **36**, 359 (1888).

[2]) Streng genommen müßte man deshalb „Sehschärfe" statt „Helligkeit" sagen.

Tabelle I.

		Wellenlänge λ in μ										
		0,35	0,38	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,768
G_λ	*S. P. L.*	1,8	3,7	5,3	11,9	17,3	20,7	21,9	22,2	21,4	20,7	20,2
h_λ	*S. P. L.*	—	—	—	0,50	3,36	14,61	10,40	1,62	0,096	—	—
	F. W. V.	—	—	0,36	17,21	64,76	85,69	8,22	0,44	0,092	—	—
		—	—	0,81	17,18	172,4	127,0	14,61	0,83	0,15	—	—
		—	—	0,56	19,11	172,8	146,7	13,37	0,93	0,11	—	—
		0,0092	0,062	0,47	—	—	—	—	0,97	—	0,0015	0,0003
	Mittel	0,0092	0,062	0,55	17,83	136,65	119,8	12,07	0,79	0,117	0,0015	0,0003
	B. E. L.	—	—	0,65	52,23	175,7	164,2	20,07	1,42	0,058	0,0003	—
		0,000	0,011	0,63	18,95	140,5	107,6	18,44	1,90	0,25	0,0012	—
		—	—	0,94	61,56	208,0	120,0	38,09	2,50	0,26	—	—
	Mittel	0,000	0,011	0,74	44,58	174,7	130,6	25,53	1,97	0,189	0,0008	—
	E. M.	—	—	0,95	53,23	111,9	119,5	27,05	2,44	0,50	—	—
		—	—	0,52	14,51	51,84	56,94	22,82	1,27	—	—	—
	Mittel	—	—	0,74	33,87	81,87	83,72	24,94	1,86	0,50	—	—
$\frac{h_\lambda}{G_\lambda}$	*S. P. L.*	—	—	—	0,042	0,194	0,706	0,475	0,073	0,004	—	—
	F. W. V.	0,0051	0,0168	0,104	1,50	7,90	5,79	0,551	0,036	0,005	0,00007	0,00001
	B. E. L.	0,000	0,0030	0,139	3,75	10,10	6,31	1,17	0,089	0,009	0,00004	—
	E. M.	—	—	0,140	2,85	4,73	4,04	1,14	0,084	0,023	—	—
	Mittel	0,0026	0,0099	0,128	2,70	7,58	5,38	0,954	0,070	0,012	0,00006	0,00001

Tabelle II.

	Wellenlänge λ in μ						
	0,40	0,47	0,53	0,58	0,60	0,65	0,75
$\frac{h_\lambda}{G_\lambda}$	1600	62 000	100 000	28 000	14 000	1200	1

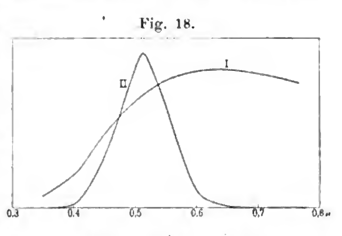
Fig. 18 gibt ein graphisches Bild der Versuchsergebnisse, und zwar sind in Kurve I die in der ersten Horizontalreihe von Tabelle I angegebenen Größen G_λ, in Kurve II die in der letzten Horizontalreihe zusammengestellten Werte h_λ/G_λ als Funktionen der Wellenlänge in rechtwinkeligen Koordinaten aufgetragen.

Folgerungen aus den Versuchen.

Das Auge ist für verschiedene Wellenlängen sehr verschieden empfindlich, am empfindlichsten für die grünen Strahlen (λ = etwa 0,53 μ).

Wenn von zwei Flächen a und b, welche das gleiche *Emissionsvermögen* besitzen, a nur Strahlen von der Wellenlänge 0,50 μ, b nur solche von der Wellenlänge 0,70 μ aussendet, so erscheint nach Tabelle I a 630 (7,58 : 0,012) mal so hell wie b. Wir sagen dann: a besitzt eine 630 mal so große *Flächenhelle* wie b. Sind die beiden Flächen a und b gleich groß, haben also a und b die gleiche *Strahlungsstärke*, so sagen wir dann: a besitzt eine 630 mal so große *Lichtstärke* wie b.

Fig. 18.



Da die Werte h_λ/G_λ auch ein relatives Maß für das physiologische Absorptionsvermögen K_λ geben, so folgt weiter:

K_λ ändert sich beträchtlich mit der Wellenlänge, d. h. die Netzhaut absorbiert die verschiedenen Farben verschieden stark; sie wirkt also *selektiv absorbierend.*

Ferner wurden von Langley auch diejenigen Energieströme in absolutem Maße abgeschätzt, welche zur Weckung einer gewissen schwachen Empfindung nötig sind. Es wurden dabei nicht die der minimalen Empfindung entsprechenden Energieströme (*Reizschwellenwerte*), sondern diejenigen Beträge bestimmt, bei welchen der Beobachter noch das Schwächen und Sichwiederaufhellen des Lichtes bemerken konnte, also die Energieströme, wo noch eine wenn auch tiefliegende *Unterschiedsschwelle* (vgl. § 72) zu beobachten war. Die erhaltenen Zahlen sind die folgenden:

Violett	Grün	Rot	Braun
0,40 μ	0,55 μ	0,65 μ	0,75 μ
$\frac{1}{1,5 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{360 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{1,6 \cdot 10^6}$	$\frac{1}{780}$ Erg für $\frac{1}{2}$ Sekunde

b) Ungefähr gleichzeitig hatte H. Ebert[1]) gemeinsam mit einem Assistenten für mehrere Wellenlängen die *Reizschwellenwerte* bestimmt und dabei die in Tabelle III mitgeteilten Zahlen gefunden; hierin bezeichnen S und E die Initialen der beiden Beobachter.

Tabelle III.

Farbe	Mittlere Wellenlänge	Relative Reizschwellenwerte		Relative Reizempfindlichkeit (Grün gleich 1 ges.)	
	$\mu\mu$	S	E	S	E
Rot	675	151	202	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{34}$
Gelb	590	90	104	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{17}$
Grün	530	6	6	1	1
Grünblau	500	8	12	$\frac{1}{1,3}$	$\frac{1}{2}$
Blau	470	20	22	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$

Bei dem normalen Auge ist demnach die zur Auslösung einer Lichtempfindung nötige Energie der erregenden Ätherbewegung am geringsten für grüne Strahlen (λ etwa gleich 530 $\mu\mu$), etwa 1,3 bis 2 mal so groß für Grünblau usw. Dieses Ergebnis stimmt also ungefähr mit dem Langleyschen überein.

c) Unter Benutzung der Langleyschen Werte G_λ hat A. König[2]) aus seinen im vorigen Paragraphen erwähnten Helligkeitskurven die Werte h_λ / G_λ berechnet, die er *Energie-Helligkeitswerte* nennt. Beispielsweise ergaben sich für die höchste Helligkeitsstufe die in Tabelle IV zusammengestellten Zahlen.

Tabelle IV.

	Wellenlänge λ in μ										
	0,67	0,650	0,625	0,605	0,590	0,575	0,555	0,535	0,520	0,505	0,490
$\frac{h_\lambda}{G_\lambda}$ . .	0,066	0,27	0,62	0,92	1,02	1,04	1,15	1	0,77	0,46	0,27

[1]) Wied. Ann. 33, 136 (1888).
[2]) Literatur s. S. 61.

d) Endlich hat A. Pflüger[1]), ähnlich wie Ebert, die Empfindlichkeit des Auges für Licht verschiedener Wellenlänge nur bei den Schwellenwerten der Reizempfindung bestimmt.

§ 27. Das Auge als Energiemesser. Aufgaben der praktischen Photometrie.

a) Das Auge als Energiemesser.

Aus Gleichung 10), S. 60, ergibt sich folgendes: In welcher Entfernung von AB sich auch das Auge in der Ausstrahlungsrichtung ε befinden möge, stets wird von dem von AB ausgehenden und auf die Pupille auffallenden Energiestrome G_l der gleiche Bruchteil K_l in physiologische Energie umgewandelt. Wir wollen nun die beiden möglichen Fälle a) und b) betrachten.

a) Die Fläche AB (Fig. 16, S. 56) ist *selbstleuchtend*; sie besitze unter dem Ausstrahlungswinkel ε die Strahlungsstärke U_l und das Emissionsvermögen η_l.

Befindet sich die Pupille z. B. einmal in der Entfernung 1, ein anderes Mal in der Entfernung r von AB, wird sie also das eine Mal vom Energiestrom

$$g_l = U_l s = \eta_l \sigma s \cos\varepsilon \quad \ldots \ldots \quad 1)$$

das andere Mal vom Energiestrom

$$G_l = \frac{g_l}{r^2} = \frac{U_l s}{r^2} = \frac{\eta_l \sigma s \cos\varepsilon}{r^2} \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

getroffen, so wird nacheinander der Anteil

$$\Phi_l = K_l g_l; \quad \Phi_l = K_l G_l \quad \ldots \ldots \quad 3)$$

in physiologische Energie umgewandelt.

Die physiologische Wirkung auf das Auge ist also gerade so groß, als ob letzteres ein vollkommener Energiemesser wäre, d. h. alle sichtbare Energie absorbieren würde, und als ob AB nacheinander nicht die Energieströme g_l und G_l,

sondern die Energieströme $K_l g_l$ und $K_l G_l$ zum Auge senden würde,

und als ob dementsprechend AB nicht die Strahlungsstärke U_l,

sondern die Strahlungsstärke $K_l U_l$,

und als ob AB nicht das Emissionsvermögen η_l,

sondern das Emissionsvermögen $K_l \eta_l$

besitzen würde.

b) Die Fläche AB ist nicht selbstleuchtend, sondern wird durch eine Lichtquelle L *beleuchtet*.

[1]) Ann. d. Phys. (4) 9, 185 (1902).

Dagegen ist für Körper, welche nur regelmäßig reflektieren, für welche also $M_1 = M_2 = \cdots = 0$ ist,

$$\eta_1 : \eta_2 : \cdots = (1 - R_1) : (1 - R_2) : \cdots \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

wo R_1, R_2 ... vom Einfallswinkel abhängig und nach den Reflexionsformeln zu berechnen sind. Damit ist das Gesetz gegeben, welches für vollkommen regelmäßig reflektierende Körper an die Stelle des Lambertschen Gesetzes tritt.

v. Uljanin berechnet nun nach den Fresnelschen bzw. Metallreflexions-Formeln die Größe $(1 - R)$ für Glas, Platin, Silber und Kupfer, wobei er die Drudeschen optischen Konstanten der Metalle für rotes Licht[1]) benutzt.

Die für Glas berechneten Zahlen stimmen genügend mit den von Provostaye und Desains[2]) gefundenen überein. Dagegen zeigen die Zahlen von Möller (S. 81) für glühendes Platin eine größere Annäherung an das Lambertsche Gesetz, als es die Theorie verlangt. Dies erklärt v. Uljanin dadurch, daß das von Möller benutzte Platinblech hellglühend sein mußte und dabei durch Zerstäubung sehr bald etwas rauh wurde. Diese Annahme wird durch die Tatsache gestützt, daß der von Möller bestimmte Prozentgehalt des polarisierten Lichtes (vgl. S. 41, Folgerung c) kleiner ist, als er der Theorie nach sein müßte.

c) $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz für diffus reflektierende Körper.

α) Experimentelle Untersuchungen.

Graphische Diskussion.

Um besser die Beobachtungen diskutieren zu können, pflegt man nach dem Vorgange von Bouguer die folgenden Flächen zu konstruieren:

1. Man trägt für einen bestimmten einfallenden Strahl, also bei konstantem i, auf jeden von σ ausgehenden Strahl die Flächenhelle auf, welche σ in dieser Richtung besitzt, oder anders ausgedrückt: man trägt bei konstantem i die Flächenhelle $e_{i,\varepsilon}$ (bzw. das Emissionsvermögen $\eta_{i,\varepsilon}$) als Funktion von ε in Polarkoordinaten auf, deren Anfang in σ liegt. Die Endpunkte dieser Strecken liegen auf einer Fläche *a*, welche gewöhnlich Helligkeitsfläche genannt wird.

2. Man trägt die Lichtstärke $J_{i,\varepsilon}$ (bzw. die Strahlungsstärke $U_{i,\varepsilon}$) als Funktion von ε auf (Diffusionsfläche *b*).

3. Man trägt für ein gegebenes ε $e_{i,\varepsilon}$ (bzw. $\eta_{i,\varepsilon}$) als Funktion von i auf (Fläche *c*).

4. Man trägt $J_{i,\varepsilon}$ (bzw. $U_{i,\varepsilon}$) als Funktion von i auf (Fläche *d*).

---

[1]) Wied. Ann. 39, 481 (1890).

[2]) C. R. 24, 60 (1847).

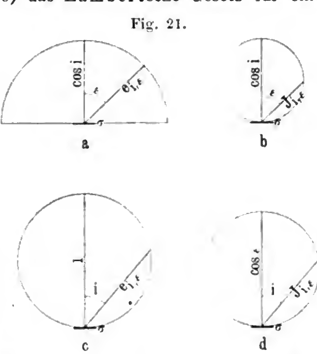
Setzt man die Flächenhelle bei senkrechter Beleuchtung und senkrechter Ausstrahlung ($i = \varepsilon = 0$) gleich 1, so ist bei Gültigkeit des Lambertschen Gesetzes von den vier Flächen *a* bis *d*

a eine Halbkugel um σ mit $\cos i$ als Radius (Fig. 21 a),
b eine σ berührende Kugel vom Durchmesser $\cos i$ (Fig. 21 b),
c eine σ berührende Kugel vom Durchmesser 1 (Fig. 21 c),
d eine σ berührende Kugel vom Durchmesser $\cos \varepsilon$ (Fig. 21 d).

Meistens wurde das Gesetz nur für in der Einfallsebene liegende Strahlen geprüft; alsdann kommt natürlich nur die Schnittkurve dieser Ebene mit den vier Flächen in Betracht.

Für strahlende Wärme finden Provostaye und Desains[1]) bei senkrechter Bestrahlung ($i = 0$) das Lambertsche Gesetz für eine Bleiweißplatte vollständig, für eine Zinnober- und Chrombleiplatte nahezu bestätigt, während beim pulverisierten Silber die Strahlungsstärke $U_{i,\varepsilon}$ mit wachsendem ε viel schneller als $\cos \varepsilon$ abnimmt. Nach Godard[2]) ist bei $i = 0$ für hinreichend dicke Schichten das Gesetz streng gültig. Dagegen erhält Ångström[3]) bei senkrechter Bestrahlung als Diffusionsfläche ein in Richtung der Flächennormale verlängertes Ellipsoid, dessen Rotationsachse in die Flächennormale fällt; bei zunehmendem i wird das Ellipsoid immer mehr abgeplattet, geht bei i gleich 30° in eine Kugel und dann in ein abgeplattetes Ellipsoid über. Einen ähnlichen Verlauf zeigen auch die oben definierten Flächen *d*. Auch Hutchins[4]) findet im allgemeinen merkliche Abweichungen vom Lambertschen Gesetze.

Fig. 21.



Die photometrischen Messungen von Bouguer[5]) an mattem Silber, Gips und holländischem Papier ergeben, daß bei nahezu übereinstimmender Einfalls- und Sehrichtung, also bei $\varepsilon = i$, die Flächenhelle nicht proportional $\cos i$ ist, sondern mit wachsendem i schneller

---

[1]) C. R. **24**, 60 (1847); Pogg. Ann. **74**, 147 (1848); C. R. **33**, 444 (1851); Ann. Chim. Phys. (3) **34**, 192 (1852).

[2]) Ann. Chim. Phys. (6) **10**, 354 (1887); J. de Phys. (2) **7**, 435 (1888).

[3]) Wied. Ann. **26**, 253 (1885); Beibl. **12**, 197 (1888).

[4]) Sill. J. (4) **6**, 373 (1898).

[5]) Essai d'optique sur la gradation de la lumière, Paris 1729; Traité d'optique, ouvr. posth., publié par l'Abbé de Lacaille, Paris 1760.

der Natur des diffus reflektierenden (oder durchlassenden) Schirmes ab, falls dieser kein grauer Körper (S. 20) ist, da dann der diffus reflektierte (oder durchgelassene) Energiestrom eine andere spektrale Zusammensetzung als der auffallende hat.

Im folgenden wollen wir stets *graue* Körper als Photometerschirme voraussetzen.

Das Auge vermag diese photometrischen Größen nicht direkt zu messen. Wohl aber besitzt es eine verhältnismäßig große Empfindlichkeit gegen Helligkeits- und Kontrastunterschiede, wie wir in § 72 sehen werden. Infolge dieser Fähigkeit kann man mit dem Auge *vergleichende Messungen* ausführen. Aus diesem Grunde und auch deshalb, weil im Auge ein stationärer Zustand eintritt, kommt hierbei die Zeit nicht in Betracht.

b) Aufgaben der praktischen Photometrie.

Die praktische Photometrie beschäftigt sich mit vergleichenden Messungen von Lichtströmen, Lichtstärken, Flächenhellen und Beleuchtungsstärken.

Sind die zu vergleichenden Lichtquellen genau *gleich gefärbt* (§ 102), so ist das Verhältnis der Lichtstärken gleich dem der Strahlungsstärken. In diesem Falle kann man vom theoretischen Standpunkte aus *jeden beliebigen Energiemesser*, z. B. die Thermosäule, das Bolometer, die von Werner Siemens vorgeschlagene Selenzelle, oder auf der chemischen Wirksamkeit der Strahlen (vgl. S. 3) beruhende Apparate benutzen.

Sind die zu vergleichenden Lichtquellen dagegen *ungleich gefärbt*, so ist das Lichtstärkenverhältnis nicht gleich dem Strahlungsstärkenverhältnis. Da es keinen Apparat gibt, welcher die Energie so wie das Auge mißt, so darf in diesem Falle *nur das Auge* zum Vergleich benutzt werden. Allerdings ist das Auge nur ein unvollkommener Energiemesser, da es nur auf einen beschränkten Wellenlängenbereich und innerhalb des letzteren auch noch auswählend reagiert. Dafür aber ist es für diesen Bereich mit einer *außerordentlichen Empfindlichkeit* ausgestattet, wie z. B. die Untersuchungen von Tumlirz (S. 53) und Langley (S. 66) zeigen.

Über *photometrisches Reflexionsvermögen* usw. s. S. 19.

Im folgenden soll nur von den photometrischen Größen die Rede sein, falls nichts anderes ausgesagt wird.

§ 28. Die Empfindung der Farbe.

Leuchtende Ätherwellen verschiedener *Schwingungsdauer* bringen im Gehirn die Empfindung verschiedener *Farbe* hervor. Jedoch hängt der Farbeneindruck von der Helligkeit derart ab, daß sich alle Farben bei gesteigerter Helligkeit dem Weiß oder Weißgelben nähern, dagegen bei sehr geringer Helligkeit farblos erscheinen. Wenn man ein lichtstarkes Spektrum allmählich abschwächt, so verschwinden zuerst die

roten und blauen Farben, dann die gelben, und schließlich erscheint ein farbloses Dunkelspektrum, welches, wie gleich hier bemerkt werden möge, mit dem lichtstarken Spektrum der Totalfarbenblinden übereinstimmt. Die Erscheinung des farblosen Dunkelspektrums wurde zuerst von Brewster, dann von W. v. Bezold[1]) gesehen und später von Hering und Hillebrand[2]) ausführlicher untersucht.

a) Theorie von Young-Helmholtz.

Auf der Netzhaut existieren drei photochemische Substanzen, durch deren Erregung alle Farbenempfindungen im Gehirn zu Stande kommen. Jede Farbe zersetzt alle drei Substanzen, aber in verschiedenem Grade, und zwar bewirkt die Zersetzung der ersteren Art die Empfindung Rot, die Zersetzung der zweiten die Empfindung Grün und die Zersetzung der dritten die Empfindung Blau. Die gleichzeitige Zersetzung aller drei Substanzen in gewissen Größenverhältnissen gibt die Empfindung Weiß. Bei Partiellfarbenblinden (Rot- oder Grünblinden) wird stets gleich viel von der Rot- und Grünsubstanz zersetzt. Bei Totalfarbenblinden haben sich die Sehsubstanzen zu einer einzigen verschmolzen oder sind zum Teil ausgeschaltet.

b) Theorie von Hering.

Es gibt drei Elementarempfindungen, die aber positiv und negativ sein können. Die eine Empfindung gibt im Zustande der Ruhe Schwarz, im gereizten Zustande Weiß. Die zweite gibt entsprechend die beiden Komplementärfarben Blau und Gelb, die dritte Rot und Grün.

c) Theorie von A. König[3]).

Die Stäbchen vermitteln das farblose Sehen der Farbentüchtigen bei sehr geringer Helligkeit und das Sehen der Totalfarbenblinden bei beliebiger Helligkeit. Das Sehgelb spielt die Rolle der blau empfindenden Nervenart. Das Sehen der übrigen Farben rührt von den Zapfen her. Da in der fovea centralis kein Sehpurpur, also auch kein Sehgelb vorkommt, müßten im Gegensatze zu der tatsächlichen Beobachtung nach dieser Theorie Farbentüchtige hier blaublind, Totalfarbenblinde totalblind sein.

d) Theorie von Kries[4]).

Nach dieser Theorie, welche die bisherigen Widersprüche löst, sind bei sehr geringer Helligkeit nur die *Stäbchen* als der totalfarbenblinde „*Dunkelapparat*", welcher seine Empfindlichkeit im Dunkeln ganz bedeutend zu steigern vermag (Dunkeladaption), wirksam und erwecken im Gehirn die Empfindung der *farblosen Helligkeit*. Bei gesteigerter

[1]) Pogg. Ann. **150**, 71 (1873).
[2]) Sitzgsber. der Wien. Akad., Math.-naturw. Kl. 98, Abt. 3, S. 70 (1899).
[3]) Berl. Ber., S. 577 (1894).
[4]) Z. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane **9**, 81 (1894).

Entfernung zwischen L und σ'; i den Einfallswinkel der von L' auf σ' gesandten Strahlen; E die von L' auf σ' erzeugte Beleuchtung; $e_{i,\varepsilon}$ die Flächenhelle, $J_{i,\varepsilon}$ die Lichtstärke von σ unter dem Ausstrahlungswinkel ε, so kann man analog Gleichung 14), S. 79, auch hier allgemein setzen

$$e_{i,\varepsilon} = t \cdot E, \quad \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

wo wir t den *Durchlässigkeitskoeffizienten* von ab für die Winkel i und ε nennen wollen. Demnach wird

$$e_{i,\varepsilon} = t \cdot \frac{J'}{r'^2} \cdot \cos i; \quad J_{i,\varepsilon} = t \cdot \frac{J'}{r'^2} \cdot \sigma \cos \varepsilon \cos i \quad \ldots \quad 9)$$

Bei Gültigkeit des Lambertschen Gesetzes müßte auch t eine von i und ε unabhängige Konstante, also $J_{i,\varepsilon}$ wieder $\cos i$ und $\cos \varepsilon$ proportional sein.

Eine Substanz, für die $J_{i,\varepsilon}$ proportional $\cos \varepsilon$ bzw. $\cos i$ ist, werde *vollkommen diffus durchlassend* bzw. wieder *orthotrop* (vgl. S. 79) genannt.

Über diesen Gegenstand liegen nur wenige Untersuchungen vor. Ångström findet, wie bei diffus reflektierenden Substanzen, selbst bei hinreichender Schichtdicke das Lambertsche Gesetz nicht bestätigt. Nach Crova[1]) befolgt eine zwischen zwei Glasplatten gelegte Schicht aus dem Stärkemehl der Zuckerrübe bei $i = 0$ das Lambertsche Gesetz um so mehr, je dicker die Schicht ist. Chwolson[2]) findet für Milchglas von mindestens 2 mm Dicke $J_{i,\varepsilon}$ nicht proportional $\cos \varepsilon$, sondern schneller als $\cos \varepsilon$ abnehmend; der Durchlässigkeitskoeffizient t nimmt also mit wachsendem ε ab und ist für $\varepsilon = 60^0$ um 13 Proz. kleiner als für $\varepsilon = 0$, unter welchem konstanten Einfallswinkel i die Strahlen auch auftreffen mögen. Nach Blondel[3]) ist $J_{i,\varepsilon}$ für Papier von gewöhnlicher Dicke nur bis zu $i = 10^0$, dagegen für eine auf der Vorderseite mattierte Milchglasplatte (Albatrin) bis $i = 20^0$ merklich $\cos i$ proportional, dagegen in beiden Fällen nicht proportional $\cos \varepsilon$, sondern bis etwa 30^0 proportional $\cos^n \varepsilon$, wo n eine zwischen 1 und 2 liegende Zahl bedeutet; t ist also nur bis $i = 10$ bzw. 20^0 von i unabhängig, ferner proportional $\cos^{n-1} \varepsilon$. Mit anderen Worten: Papier und Milchglas (Albatrin) sind bis $i = 10$ bzw. 20^0 orthotrope Substanzen (vgl. § 97 und 134).

Nach F. F. Martens[4]) zeigen drei aufeinandergelegte mattierte Glasplatten, welche ebensoviel Licht durchlassen, wie ein Gipsschirm reflektiert, bedeutende Abweichungen vom Lambertschen Gesetze, so daß sie für photometrische Zwecke unbrauchbar sind.

---

[1]) Ann. Chim. Phys. (6) **6**, 342 (1885).
[2]) Bull. de St. Pétersbourg **31**, 213 (1887); Mél. phys. et chim. **12**, 475 (1886).
[3]) L'Éclair. électr. **3**, 406 (1895).
[4]) J. f. G. u. W. **43**, 250 (1900).

C. Folgerungen aus den photometrischen Gesetzen.

§ 32. Ausgedehnte leuchtende Fläche und kleines beleuchtetes ebenes Flächenstück.

a) Ausgedehnte leuchtende Fläche.

Eine ausgedehnte Fläche S soll ein Flächenelement s beleuchten. Wir zerlegen die Fläche S in lauter Elemente σ, berechnen nach Gleichung 4), S. 76, den von jedem Elemente σ nach dem Flächenelement s gehenden Lichtstrom und erhalten durch Addition sämtlicher Ausdrücke den gesamten Lichtstrom

$$\Phi = \sum \frac{e\,\sigma\,s\cos\varepsilon\cos i}{r^2}.$$

Liegt s soweit von S entfernt, daß wir wie auf S. 30 für die einzelnen Elemente σ sowohl r als i konstant ansehen dürfen, so wird

$$\Phi = \frac{s\cos i}{r^2} \sum e\,\sigma\cos\varepsilon \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

wo r die Entfernung zwischen s und der Mitte von S, ferner i den Einfallswinkel der von dieser Mitte auf s fallenden Strahlen bezeichnet.

Setzen wir

$$\Sigma\, e\,\sigma\cos\varepsilon = J \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

so erhalten wir

$$\Phi = \frac{J\,s\cos i}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

J in Gleichung 2) bezeichnet also die Lichtstärke der ausgedehnten leuchtenden Fläche in Richtung r und für hinreichend große Entfernung.

Spezieller Fall. S soll eine kleine ebene Fläche sein und gleichmäßig leuchten, d. h. alle Elemente σ sollen in parallelen Ausstrahlungsrichtungen die gleiche Flächenhelle e besitzen.

Alsdann gehen Gleichungen 1) und 2) über in

$$\Phi = \frac{e\,S\,s\cos\varepsilon\cos i}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

und

$$J = e\,S\cos\varepsilon \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

Demnach ist die auf s erzeugte Beleuchtung

$$E = \frac{e\,S\cos\varepsilon\cos i}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

Gleichung 4) unterscheidet sich von Gleichung 4) auf S. 76 nur dadurch, daß an Stelle von σ die Größe S tritt; mit anderen Worten:

b) Lichtstärke J.

Unter der *Lichtstärke* J eines Punktes L in der Richtung LO (Fig. 4, S. 27) werde das Verhältnis

$$J = \frac{\Phi}{\omega} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

verstanden, wo ω einen unendlich kleinen räumlichen Winkel, dessen Achse LO ist, und Φ den in den räumlichen Winkel ω ausgestrahlten Lichtstrom bezeichnet.

Falls L nach allen Richtungen gleich stark strahlt, können wir auch sagen:

Die Lichtstärke J ist gleich dem in den räumlichen Winkel 1 ausgestrahlten Lichtstrom;

oder noch anschaulicher:

Die Lichtstärke J ist gleich dem Lichtstrom, welcher von L auf **1 qm** der Oberfläche der Kugel ausgestrahlt wird, die mit dem **Radius 1 m** um L beschrieben ist.

Gleichung 1) läßt sich in der Form schreiben:

$$\Phi = J\omega \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Mit anderen Worten:

Der von L in den unendlich kleinen räumlichen Winkel ω ausgestrahlte Lichtstrom ist gleich ω, multipliziert mit der Lichtstärke J, welche L in der Richtung der Achse von ω besitzt.

c) Beleuchtung E.

Fällt von einer beliebigen Lichtquelle auf ein Flächenelement s der Lichtstrom Φ auf, so wird die Größe

$$E = \frac{\Phi}{s} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

[vgl. Gleichung 4), S. 14] die auf s erzeugte *Beleuchtung* genannt; in Gleichung 3) wird s in **qm** gezählt.

E ist also der Lichtstrom, welchen die am Orte s befindlich gedachte Flächeneinheit (1 qm) von der Lichtquelle empfängt.

Aus Gleichung 3) folgt:

$$\Phi = Es \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Man erhält also den Lichtstrom, den das in qm gezählte Flächenelement s empfängt, wenn man die Beleuchtung E mit s multipliziert.

Aus Gleichung 2) lassen sich mittels des Grundgesetzes a die beiden folgenden Grundgesetze ableiten (s. Fig. 5, S. 29).

d) Lamberts Entfernungsgesetz.

Der Lichtstrom Φ, welchen ein Punkt L einem im Abstande r senkrecht zur Strahlenrichtung LO liegenden Flächenelement s zusendet,

ist umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes r; es ist nämlich

$$\Phi = \frac{J s}{r^2} \qquad 5)$$

wenn J die Lichtstärke von L in der Richtung LO bezeichnet.

In Gleichung 5) ist r in m, s in qm zu zählen.

Demnach ist nach Gleichung 3)

$$E = \frac{J}{r^2} \qquad 6)$$

Die Beleuchtung, welche eine Lichtquelle in der Entfernung 1 erzeugt, ist also 4, 9 ... mal so groß wie die in der Entfernung 2, 3 ... erzeugte.

e) Lamberts Kosinusgesetz des Einfallswinkels ($\cos i$-Gesetz).

Bildet die Strahlenrichtung mit der Normalen von s *den Winkel* i *(Einfallswinkel), so ist der von* L *nach* s *gesandte Lichtstrom* $\cos i$ *proportional*; es ist nämlich

$$\Phi = \frac{J s \cos i}{r^2} \qquad 7)$$

wo wieder r in m, s in qm zu zählen ist.

Mithin ist

$$E = \frac{J \cos i}{r^2} \qquad 8)$$

§ 30. System leuchtender Punkte und leuchtendes Flächenelement.

Dieser Paragraph entspricht §§ 13 und 14.

a) Lichtstärke.

Bei einem System leuchtender Punkte kann man für hinreichend große Entfernungen von der Lichtstärke des Punktsystems reden.

Der inmitten des Systems gelegene *äquivalente* Punkt (S. 31) werde die Mitte des Punktsystems oder allgemeiner die *Mitte der Lichtquelle (Lampenmitte)* genannt.

Da ein Flächenelement als aus lauter punktförmigen Flächenelementen zusammengesetzt gedacht werden kann, darf man auch von der Lichtstärke eines Flächenelementes für jede beliebige endliche Entfernung reden.

Bezeichnet $AB = \sigma$ (Fig. 7, S. 31) ein leuchtendes Flächenelement und J seine *Lichtstärke unter dem Ausstrahlungswinkel* ε, so läßt sich schreiben

$$J = e \sigma \cos \varepsilon \qquad 1)$$

wo T und t das diffuse Durchlässigkeitsvermögen bzw. den Durchlässigkeitskoeffizienten (S. 16 und 88) bezeichnen.

Beispiel (s. auch § 70, Beispiel c). Es sei $M = 0{,}8$; $E = 50$; alsdann ist

nach Gleichung 1) $e = 0{,}00127$,
nach Gleichung 2) $m = 0{,}0000255$.

§ 35. Beleuchtung eines orthotropen Körpers durch ein System von Lichtquellen.

Es seien L', L'' ein System von Lichtquellen, E', E''... die von ihnen unter den Einfallswinkeln i', i'' ... auf einem Elemente σ erzeugten Beleuchtungen. Alsdann ist die Gesamtbeleuchtung, welche σ erhält,

$$E = E' + E'' + \cdots \qquad 1)$$

Ist σ das Oberflächenelement eines *orthotropen* Körpers (S. 79), so ist die Gesamtflächenhelle e, welche σ durch Einwirkung aller Lichtquellen unter dem Ausstrahlungswinkel ε erlangt,

$$e = mE' + mE'' + \cdots \qquad 2)$$

so daß

$$e = mE \qquad 3)$$

wo m nur von dem Winkel ε abhängt.

Es ist dann also bei gegebenem ε die Gesamtflächenhelle e der Gesamtbeleuchtung E proportional. Mithin kann man aus der Flächenhelle auf die Beleuchtung eines durch ein System von Lichtquellen beleuchteten Elementes schließen. Diesen Schluß ziehen Weber (§ 87, c), Mascart (§ 96) usw. bei ihren zu Beleuchtungsmessungen bestimmten Photometern, indem sie annehmen, daß die benutzten Photometerschirme vollkommen orthotrope Substanzen sind.

Ist σ das Oberflächenelement eines beliebigen Körpers, so tritt an Stelle von Gleichung 2)

$$e = m'E' + m''E'' + \cdots \qquad 4)$$

wo die m', m'' ... von den i', i'' ..., ferner von ε und den Azimuten φ', φ'' ... abhängen. In diesem allgemeinen Falle spielt also auch noch die Verteilung der Lichtquellen eine Rolle.

§ 36. Äquivalente Leuchtflächen.

Das Flächenelement s (Fig. 22) sei einmal durch das Flächenelement σ, ein andermal durch das Flächenelement σ' beleuchtet, und zwar sollen σ und σ' zwei Querschnitte desselben räumlichen Winkels Ω sein, dessen Scheitel in s liegt. Wenn σ und σ' in Richtung der Achse

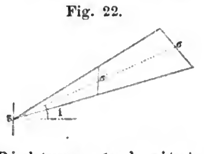
des räumlichen Winkels, also in den zusammenfallenden Richtungen σs und $\sigma' s$ die gleiche Flächenhelle e besitzen, so erhält s nach Gleichung 6), S. 76, in beiden Fällen die gleiche Beleuchtung

$$E = 10\,000\, e\, \Omega \cos i.$$

Hieraus folgt weiter:

Ohne irgend etwas in der Beleuchtung von s zu ändern, kann man den beliebigen Teil kk jeder leuchtenden Fläche SS (Fig. 23a) durch denjenigen Teil $k'k'$ einer beliebigen Fläche $S'S'$ ersetzen, welcher aus dieser Fläche durch denjenigen Kegel herausgeschnitten wird, dessen Spitze in s und dessen Basis die Fläche kk ist, sobald man jedem Element σ' von $k'k'$ diejenige Flächenhelle gibt, welche das mit s und σ' auf derselben Geraden liegende Element σ in der Richtung σs besitzt.

Fig. 22.



$k'k'$ heißt die zu kk äquivalente Leuchtfläche in bezug auf dieses Element s. Für jedes andere Element s ergibt sich eine andere äquivalente Leuchtfläche mit im allgemeinen anderer Verteilung der Flächenhelle.

Anwendung auf Blenden.

Vor eine Fläche SS (Fig. 23 b) werde eine Blende (Diaphragma), d. h. ein mit einer zentralen Öffnung $ab = f$ versehener undurch-

Fig. 23 a.

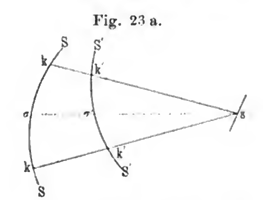
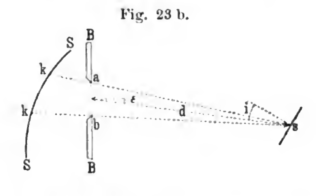


Fig. 23 b.



sichtiger Schirm BB gesetzt. In diesem Falle wird s nur durch den von s aus durch f sichtbaren Teil kk von SS beleuchtet; kk und f sind also Querschnitte desselben räumlichen Winkels. Mithin ist f die äquivalente Leuchtfläche zu kk. Ändert s seine Lage, so erhalten wir eine andere Fläche kk. Wir wollen jetzt annehmen, daß SS eine derartig diffus leuchtende Fläche sei, daß alle Elemente σ in allen Ausstrahlungsrichtungen oder doch wenigstens in den in Betracht kommenden Richtungen σs die gleiche Flächenhelle e besitzen. Die in s erzeugte Beleuchtung E ist dann dieselbe, als wenn f mit der Flächenhelle e leuchtet.

Substituieren wir den Ausdruck 9) in Gleichung 4) und setzen außerdem $r = 1$; $i = 0$, so folgt:

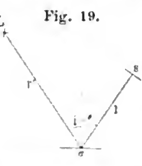
$$\Phi = c\,\sigma\, s \cos \varepsilon \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9a)$$

d. h. der Lichtstrom Φ, welcher von einem selbstleuchtenden Flächenelement σ unter ε ausgeht und auf ein zweites in der Entfernung 1 befindliches Flächenelement s senkrecht auffällt, ist $\cos \varepsilon$ proportional.

In dieser Fassung findet man gewöhnlich das Lambertsche Gesetz ausgesprochen.

β) Gesetz für diffus reflektierende Körper (*cos* $\varepsilon \cdot$ *cos* i-Gesetz). Eine von der Sonne beschienene weiße Mauer erscheint merklich gleich hell, in welcher Richtung und Entfernung man sie auch betrachten mag. Auf Grund dieser Beobachtung nimmt Lambert auch für beleuchtete und diffus reflektierende Körper an, daß die *Flächenhelle* e des Flächenelementes σ unter allen Ausstrahlungswinkeln ε *konstant* ist. Außerdem macht er noch die Annahme, daß e der von der Lichtquelle auf σ erzeugten *Beleuchtung proportional* ist, unter welchem Einfallswinkel i auch das Element σ beleuchtet wird; er setzt also

Fig. 19.



$$e = m\,E \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

wo m eine von der Oberflächenbeschaffenheit abhängige, dagegen von i und von ε unabhängige Konstante bezeichnet.

Wird σ durch eine Lichtquelle L' (Fig. 19) aus der Entfernung r' unter dem Einfallswinkel i beleuchtet, so ist nach Gleichung 8) S. 75

$$E = \frac{J' \cos i}{r'^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

wenn J' die Lichtstärke von L' in Richtung r' bezeichnet.

Es sollen jetzt der größeren Deutlichkeit wegen statt der bisherigen Bezeichnungen e, J, Φ die Bezeichnungen $e_{i,\varepsilon}$, $J_{i,\varepsilon}$, $\Phi_{i,\varepsilon}$ für die unter i auf σ auffallenden und unter ε von σ ausgehenden Strahlen gewählt werden.

Alsdann ist nach Gleichungen 10) und 11)

$$e_{i,\varepsilon} = \frac{m J'}{r'^2} \cos i \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

und nach Gleichung 1)

$$J_{i,\varepsilon} = \frac{m J'}{r'^2}\, \sigma \cos i \cos \varepsilon \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12a)$$

Ist s wieder ein in der Entfernung 1 senkrecht zur Ausstrahlungs-

richtung ε gelegenes Flächenelement, so ist der von σ nach s übergehende Lichtstrom

$$\Phi_{i,\varepsilon} = \frac{m\,J'}{r'^2}\,\sigma\, s \cos i \cos \varepsilon \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12\,b)$$

Jede der drei einander bedingenden Gleichungen 12) stellt das sogenannte verallgemeinerte Lambertsche Kosinusgesetz dar.

Für gewöhnlich setzt man in diesen Gleichungen die Konstante

$$\frac{m\,J'}{r'^2} = C \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

Führt man also L' in der konstanten Entfernung r' um das feststehende σ herum, läßt also L' unter verschiedenen Winkeln i auf σ strahlen, und zwar derart, daß L' stets dieselbe Seite σ zuwendet; also J' konstant ist, so ändern sich bei konstantem ε

$e_{i,\varepsilon}$; $J_{i,\varepsilon}$ und $\Phi_{i,\varepsilon}$ proportional $\cos i$.

Läßt man dagegen L' und σ fest, läßt also i konstant, ändert aber ε, so bleibt $e_{i,\varepsilon}$ konstant, während sich $J_{i,\varepsilon}$ und $\Phi_{i,\varepsilon}$ proportional $\cos \varepsilon$ ändern.

Wenn im folgenden von der Proportionalität einer Größe mit $\cos i$ bzw. $\cos \varepsilon$ die Rede ist, so soll die (selbstverständliche) Annahme fortgelassen werden, daß hierbei ε bzw. i konstant ist.

f) Reflexionskoeffizient.

Man kann ganz allgemein die durch eine Beleuchtung E hervorgerufene Flächenhelle $e_{i,\varepsilon}$ durch die Relation

$$e_{i,\varepsilon} = m \cdot E \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

und demnach die Größen $e_{i,\varepsilon}$, $J_{i,\varepsilon}$ und $\Phi_{i,\varepsilon}$ durch die drei Relationen 12) ausdrücken. Der Proportionalitätsfaktor m, mit welchem man E multiplizieren muß, um e zu erhalten, werde als Koeffizient der diffusen Reflexion, oder da von einem Koeffizienten der regelmäßigen Reflexion in diesem Sinne keine Rede sein kann, kurz als *Reflexionskoeffizient* bezeichnet. Es ergeben sich dann folgende vier Fälle:

Fall α. Wenn das verallgemeinerte Lambertsche Kosinusgesetz gilt, ist, wie bereits erwähnt, m für alle Werte von i und ε konstant.

Fall β. Ist $J_{i,\varepsilon}$ proportional $\cos i$, dagegen nicht proportional $\cos \varepsilon$; ist also auch $e_{i,\varepsilon}$ proportional $\cos i$, mithin auch proportional der Beleuchtung E, aber mit ε veränderlich, so ist m eine von i unabhängige, aber von ε abhängige Größe.

Eine Substanz, für welche $J_{i,\varepsilon}$ proportional $\cos i$ ist, wollen wir nach Blondel[1]) als *orthotrop* bezeichnen.

---

[1]) C. R. 120, 311 (1895).

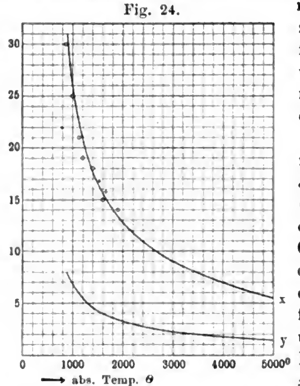
Macht man die Annahme, daß die Lichtstärke des gemischten Lichtes gleich der Summe der einzelnen Komponenten ist, so ergibt sich nach der Wienschen Gleichung V, S. 46, die Lichtstärke von 1 qcm des schwarzen Körpers in senkrechter Richtung bei der Temperatur Θ in relativem Maße zu

$$J = C_3 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{K_\lambda}{\lambda^5 \cdot e^{\frac{c}{\lambda \Theta}}} \cdot d\lambda \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

wo λ_1 und λ_2 die äußersten Wellenlängen der Langleyschen Beobachtungsreihe in Tabelle II (S. 65), nämlich 0,40 und 0,75 μ sind.

Besser wäre, wie Eisler selbst zugibt, die Anwendung der Wien-Planckschen Spektralgleichung (IV, S. 45) gewesen. Ferner würde es richtiger gewesen sein, statt der Langleyschen Zahlen, die sich auf eine geringe Helligkeit beziehen, die Zahlen zu benutzen, welche A. König für die oberste Helligkeitsstufe, bei welcher das Purkinjesche Phänomen nicht mehr auftritt, gefunden hat (Tabelle IV, S. 66).

Fig. 24.



Nach der Formel 2) hat Eisler mittels eines graphischen Verfahrens J für Temperaturen von 800 bis 6000° abs. berechnet und daraus die durch Gleichung 1) definierte Größe x bestimmt. Fig. 24 zeigt die so erhaltene x-Kurve, in welche die von Lummer und Kurlbaum für Platin (○) und von Lummer und Pringsheim für den schwarzen Körper (+) gefundenen Werte von x sehr gut hineinpassen.

Hieraus zieht Eisler die beiden folgenden Schlüsse 1 und 2, von denen der erstere noch einer experimentellen Bestätigung bedarf:

1. Für den schwarzen Körper und blankes Platin besteht zwischen x und Θ dieselbe Beziehung. Nahezu dieselbe Beziehung dürfte auch für alle bisher gebräuchlichen, auf Temperaturstrahlung beruhenden Lichtquellen gelten.

Um die Wahrscheinlichkeit der letzteren Annahme zu zeigen, stellt Eisler für den *schwarzen* Körper folgende Betrachtungen an. Bezeichnen

J_1 und J_2 die Lichtstärken für zwei wenig voneinander verschiedene Temperaturen Θ_1 und Θ_2,

G_1 und G_2 die zugehörigen, in den Raumwinkel 4π ausgesandten Gesamtenergieströme,

so geht, da nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetze (S. 44) allgemein G proportional Θ^4 ist, Gleichung 1) über in

$$\frac{J_1}{J_2} = \left(\frac{G_1}{G_2}\right)^y, \quad \dots \dots \dots \quad 3)$$

wo

$$y = x/4.$$

Dividiert man also die x-Kurve in Fig. 24 durch 4, so erhält man eine neue, in Fig. 24 mit y bezeichnete Kurve, welche aussagt, wie die Lichtstärke des schwarzen Körpers mit seinem Gesamtenergiestrom wächst.

Die Bedingung, daß die ganze zugeführte Energie in strahlende umgesetzt wird, ist bei dem im Vakuum leuchtenden Kohlenfaden der elektrischen Glühlampe möglichst erfüllt (S. 52). Nun ergibt die y-Kurve für $\Theta = 2000^0$ $y = 3{,}2$. Dieses Ergebnis stimmt nahezu mit der Tatsache überein, daß für eine normal beanspruchte elektrische Kohlenfadenlampe, deren Temperatur etwa 2000⁰ abs. beträgt, die Lichtstärke ungefähr mit der dritten Potenz des Gesamtwattverbrauches [1]) ansteigt. Daß der sich aus der y-Kurve ergebende Wert etwas höher ist, läßt sich dadurch erklären, daß der Kohlenfaden bezüglich seiner Strahlungseigenschaften zwischen dem schwarzen (bzw. grauen) Körper und dem blanken Platin, jedoch näher zum schwarzen Körper liegt; für blankes Platin würde sich $y = x/5$, also im Beispiel 2,56 ergeben.

2. Mit zunehmender Temperatur nimmt x stetig ab und nähert sich asymptotisch der Null. Dies läßt sich auch aus der Erwägung heraus einsehen, daß man mit wachsender Temperatur schließlich an einen Punkt kommen muß, von dem an der überwiegende Strahlungszuwachs immer mehr auf das ultraviolette, unsichtbare Gebiet entfällt.

β) Rasch [2]) hat aus den Lummer-Kurlbaumschen Versuchen unter der Annahme, daß

$$x\,\Theta = \text{const.} = k$$

ist, die Differentialgleichung

$$\frac{d\,J}{J} = k\frac{d\,\Theta}{\Theta^2} \quad \dots \dots \dots \quad 4)$$

abgeleitet, aus welcher sich durch Integration ergibt

$$J = J_1\, e^{k\left(\frac{1}{\Theta_1} - \frac{1}{\Theta}\right)}, \quad \dots \dots \dots \quad 5)$$

wenn J und J_1 die Lichtstärken bei den *beliebigen* Temperaturen Θ und Θ_1 bezeichnen.

Rasch weist darauf hin, daß die Differentialgleichung 4) die gleiche Form wie die van't Hoffsche Gleichung der Reaktionsisochore

[1]) Nach Voit, Bernstein und H. F. Weber ist J proportional Q^3.
[2]) Ann. d. Phys. (4) **14**, 193 (1904).

besitzt, und daß diese Analogie den Schluß nahe legt, daß die Ursache der Lichtempfindung in elektrochemischen Prozessen (Rhodopsinbleichung oder dgl.) auf der Netzhaut zu suchen ist (vgl. S. 58).

Die Raschsche Gleichung 5) ist jedoch nur als eine Näherungsformel anzusehen; denn erstens kann wegen der individuellen Verschiedenheiten in der Lichtempfindung von einer strengen Gleichung nicht die Rede sein, und zweitens trägt die Gleichung nicht dem Umstande Rechnung, daß J für Temperaturen unter derjenigen der Grauglut Null sein muß.

§ 38. Zusammenhang zwischen Ökonomie und Temperatur.

Im folgenden soll für eine Lichtquelle bezeichnen

Q die zur Unterhaltung des Leuchtens erforderliche Energie;
G_l die in den Raumwinkel 4π ausgestrahlte sichtbare Energie;
J die Lichtstärke [1]).

Wir wollen dann in Anlehnung an Schaum [2]) nennen:

1. $\mathfrak{P} = \frac{Q}{J}$ die *Ökonomie* [3]);

2. $\mathfrak{Q} = \frac{G_l}{J}$ das *räumliche Lichtäquivalent*;

3. $\mathfrak{R} = \left(\frac{G_l}{J}\right)_n : \frac{Q}{J}$ den *technischen Wirkungsgrad;* hierbei bezieht sich der Index n auf eine Einheitslampe (S. 103), als welche man gewöhnlich die Hefnerlampe (S. 53) nimmt.

a) Ökonomie $\mathfrak{P}$.

Diese Zahl gibt also die zur Erzeugung der Lichtstärke 1 (z. B. 1 Hefnerkerze = 1 HK, S. 111) erforderliche Energie an. Wie der Versuch zeigt, nimmt $\mathfrak{P}$ bei unseren gebräuchlichen, auf Temperaturstrahlung beruhenden Lichtquellen innerhalb der für die Beleuchtungstechnik üblichen Grenzen mit wachsender Temperatur stetig ab. Beispielsweise ergaben sich für eine mit 60 Volt normal brennende Kohlenfadenglühlampe die in nachstehender Tabelle mitgeteilten Werte, als die Spannung von 45,9 bis auf 110,7 Volt und dementsprechend die Temperatur erhöht wurde (vgl. S. 55). Bei 111 Volt brannte die Lampe durch; d. h. es zerspratzte der Kohlenfaden.

---

[1]) Streng genommen müßte es heißen: die *mittlere räumliche Lichtstärke* (§ 124). In nachstehender Tabelle ist J die mittlere horizontale Lichtstärke.

[2]) Z. f. wissensch. Photogr., Photophys. u. Photochem. 2, 389 (1904).

[3]) Den reziproken Wert, also die Größe J/Q, nennt man vielfach die spezifische Lichtausbeute.

Volt	Ampère	Q in Watt	J in HK	Q/J in Watt
45,9	0,380	17,44	1,50	11,6
59,4	0,524	31,12	8,98	3,47
70,2	0,650	45,62	25,8	1,77
92,5	0,935	86,48	122	0,71
110,7	1,120	124,0	199	0,62

In bezug auf den schwarzen Körper vermögen uns die Eislerschen Untersuchungen einen angenäherten zahlenmäßigen Aufschluß zu geben. Sind

Q_1 und Q_2 die bei den nahen Temperaturen Θ_1 und Θ_2 zur Unterhaltung des Leuchtens erforderlichen Energien,

$\mathfrak{P}_1$ und $\mathfrak{P}_2$ die entsprechenden Werte der Ökonomie,

so kann man unter der Annahme, daß der Verlust durch Konvektion und Leitung bei beiden Temperaturen derselbe ist,

$$G_1/G_2 = Q_1/Q_2$$

setzen, so daß Gleichung 3), S. 97, übergeht in

$$\frac{J_1}{J_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^y \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Hieraus ergibt sich

$$\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}_2} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{y-1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Für $\Theta = 2000^0$ würde demnach $\mathfrak{P}$ der 2,2ten Potenz der Energie umgekehrt proportional sein. Da mit wachsendem Θ y stetig abnimmt, nimmt auch $\mathfrak{P}$ stetig ab, so lange bis $y = 1$ wird, was bei etwa 6000^0 (der ungefähren Sonnentemperatur) eintritt. Für $y = 1$ bleibt $\mathfrak{P}$ für eine weitere kleine Temperaturzunahme konstant und nimmt, wenn die Temperatur noch mehr gesteigert wird, wieder zu.

Der Verbesserung der Ökonomie durch bloße Temperatursteigerung ist also eine unüberschreitbare Grenze gezogen. Dies dürfte auch für jeden beliebigen Temperaturstrahler gelten, nur daß diese Temperaturgrenze von Körper zu Körper verschieden ist.

b) Räumliches Lichtäquivalent $\mathfrak{Q}$.

Die Größe $\mathfrak{Q}$ gibt die zur Erzeugung der Lichtstärke 1 erforderliche sichtbare Energie an; sie stellt auch die Ökonomie in dem idealen Falle dar, daß die gesamte zugeführte Energie in sichtbare umgewandelt wird, so daß dann der physikalische Wirkungsgrad (S. 51) gleich 100 Proz. wird.

Über die Änderung der Größe $\mathfrak{Q}$ mit der Temperatur liegen nur wenig Messungen vor. Für eine neue elektrische Glühlampe, welche

bei 109 Volt, 84 Watt und 16 engl. Kerzen normal brannte, fand Merritt (Literatur s. S. 50) kalorimetrisch bei 0,9 bzw. 16,3 und 38,2 Kerzen $\mathfrak{Q} = 0,59$ bzw. 0,28 und 0,19 Watt. Messungen, die er an schon vorher gebrauchten Lampen mittels der Thermosäule ausführte, ergaben ein ähnliches Resultat; die gefundenen absoluten Werte für $\mathfrak{Q}$ sind jedoch nicht einwandfrei [vgl. S. 52, Anm. 4)].

Aus den auf S. 53 mitgeteilten Zahlen findet man das auf die englische Kerze und die Hefnerlampe bezogene räumliche Lichtäquivalent in Watt durch Multiplikation mit $4\pi \cdot 4,19$, da sich diese Zahlen auf den (horizontalen) räumlichen Winkel 1 beziehen, und da 1 g-Kal. = 4,19 Wattsekunden (S. 25) ist; vorausgesetzt ist hierbei, daß die beiden Lampen nach *allen* Richtungen gleich stark strahlen. Aus der dort angegebenen Tumlirzschen bzw. Ångströmschen Zahl folgt also

$$\mathfrak{Q}_n = 0,190 \text{ Watt/sek.} \quad \ldots \quad 6)$$

$$\text{bzw. } \mathfrak{Q}_n = 0,102 \quad \text{„} \quad \ldots \quad 6a)$$

so daß sich mit 1 Watt sichtbarer Energie eine Lichtstärke von 1/0,190 = 5,3 bzw. 1/0,102 = 9,8 HK erzeugen ließe. Die obigen Merrittschen Zahlen sind gegen die Zahlen 6) und 6 a) zu groß.

Für den *schwarzen Körper* bestimmte Eisler in dem Temperaturintervall von 800 bis 6000° abs. auch noch das Verhältnis zwischen der Lichtstärke und der zugehörigen Strahlungsstärke, nämlich

$$f(\Theta) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_\lambda H_\lambda \, d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} H_\lambda \, d\lambda} \quad . \quad 7)$$

wo H_λ das wieder nach der Wienschen Spektralgleichung berechnete Emissionsvermögen für die Wellenlänge λ bezeichnet.

Fig. 25.

Der Ausdruck 7) gibt also ein Maß für die durch sichtbare Energie 1 (z. B. 1 Watt) erzeugte Lichtstärke; er ist mithin dem räumlichen Lichtäquivalent $\mathfrak{Q}$ umgekehrt proportional. Die Kurve der Fig. 25, in welcher die Werte von $f(\Theta)$ als Funktionen von Θ aufgetragen sind, ergibt für $\Theta = 1800°$ (der ungefähren Temperatur der Hefnerlampe) 8000, für 4000° (der ungefähren Temperatur des Bogenlichtkraters) 28 600. Die Kurve hat ein Maximum, dem eine Temperatur von etwas

über 6000° entsprechen dürfte, und das ungefähr den Wert 40 000, also einen etwa fünfmal so großen Wert wie für $\Theta = 1800°$ hat.

Hieraus berechnet Eisler die für jenes Maximum auf 1 Watt kommende Lichtstärke zu 27 HK (= 5 × 5,3), indem er die Tumlirzsche Zahl, Gleichung 6), benutzt und die Annahme macht, daß die wahrscheinliche Temperatur der Hefnerlampe bei 1800° abs. liegt, und daß ihre Strahlungseigenschaften sich nicht wesentlich von denen des schwarzen Körpers entfernen. Das *minimale Lichtäquivalent* würde demnach etwa 0,038 Watt pro HK (= $^1/_{27}$) betragen; nach der einwandfreieren Zahl Ångströms, Gleichung 6a), wäre es 0,020 Watt pro HK. Die Annahme Eislers bezüglich der Strahlungseigenschaften der Hefnerlampe ist jedoch nicht zutreffend; denn Kurlbaum[1]) hat gezeigt, daß der Kohlenstoff in so dünnen Schichten, wie er sich in den gewöhnlichen Kerzen befindet, nicht zu der Gruppe von Körpern gehört, deren Strahlungseigenschaften zwischen denen des schwarzen Körpers und des blanken Platins liegen. Demnach hat selbst die aus den Messungen von Ångström abgeleitete Zahl höchstens einen *orientierenden Wert.*

c) Technischer Wirkungsgrad $\mathfrak{N}$.

Wie anfangs erwähnt wurde, wird die bei der Definition von $\mathfrak{N}$ (Gleichung 3) im Zähler stehende Größe $(G_l/J)_n$ gewöhnlich auf die Hefnerlampe bezogen. Nun ist durchschnittlich z. B. für die

	Kohlenfaden-	Osmium-	gewöhnl. Bogenlampe
$\mathfrak{P} =$	3,4	1,9	1,0 Watt.

Unter Zugrundelegung der Ångströmschen Zahl, Gleichung 6a), würde demnach sein

$$\mathfrak{N} = \frac{0{,}102}{3{,}4} \qquad \frac{0{,}102}{1{,}9} \qquad \frac{0{,}102}{1{,}0}$$
$$= 3{,}0 \qquad 5{,}4 \qquad 10 \text{ Proz.}$$

Nehmen wir statt der Hefnerlampe eine höher temperierte Lichtquelle, so erhalten wir für $(G_l/J)_n$, mithin auch für $\mathfrak{N}$ eine kleinere Zahl. Der in § 20 definierten Größe, für welche der wenig glückliche Name „mechanisches Äquivalent der Lichteinheit“ gewählt ist, kommt also eine physikalische Bedeutung nicht zu — im Gegensatz zu dem mechanischen Äquivalent der Wärmeeinheit, das für jeden beliebigen Umwandlungsprozeß von Arbeit in Wärme den unveränderlichen Wert von 427 mkg pro kg-Kal behält.

Zur Berechnung des Wirkungsgrades $\mathfrak{N}$ sollte man nach Eisler deshalb nicht den zufälligen Wert der Hefnerlampe, sondern — vom theoretischen Standpunkte aus — *das überhaupt erreichbare kleinste Lichtäquivalent* $\mathfrak{L}$, mit anderen Worten *die überhaupt erreichbare gün-*

[1]) Phys. Z. 3, 187 (1901/1902).



stigste Ökonomie zugrunde legen. Die letztere würde nach den Langleyschen Untersuchungen diejenige Lichtquelle besitzen, welche die gesamte zugeführte Energie in allaktine Strahlung der Wellenlänge 0,53 μ umsetzt. Die bei diesem Leuchtprozeß durch die Energie 1 erzeugte Lichtstärke würde nach dem der Fig. 25 zugrunde liegenden Maßstabe (wo gemäß der Langleyschen Tabelle II, S. 65, für $\lambda = 0{,}53$ $K_\lambda = 100\,000$ gesetzt ist) 100 000 gegenüber dem Werte 8000 betragen, der nach Fig. 25 dem schwarzen Körper für die Temperatur der Hefnerlampe angenähert zukommt; diese Lichtstärke würde also etwa 12,5 mal so groß als die des schwarzen Köpers bei 1800° abs. sein.

Aber abgesehen davon, daß dieses Ziel überhaupt kaum je erreichbar ist, muß es aus physiologischen und hygienischen Gründen abgelehnt werden; denn das von einer praktischen Lichtquelle ausgestrahlte Licht muß in seiner Zusammensetzung dem Sonnenlicht möglichst nahe kommen. Das Spektrum des letzteren dürfte sich nicht wesentlich von dem des hoch temperierten schwarzen Körpers unterscheiden. Dementsprechend empfiehlt Eisler als das „praktische minimale Lichtäquivalent" den sich für den schwarzen Körper ergebenden, S. 101 erwähnten Minimalwert. Nach Schaum ist die Sonnentemperatur wahrscheinlich etwas niedriger als die Temperatur jenes Äquivalentes. Aus diesem und noch anderen Gründen schlägt er als jenes Minimum den Wert vor, welcher dem Sonnenlichte unter den günstigsten Bedingungen (hoher Sonnenstand, klare Atmosphäre usw.) zukommt, und führt entsprechende Rechnungen aus.

Viertes Kapitel.

Einheitslampen und Zwischenlichtquellen.

A. Bedingungen für eine Lichteinheit.

§ 39. Allgemeine Bedingungen.

Die Strahlungsstärke einer Lichtquelle läßt sich in absolutem Maße messen (vgl. § 20). Dagegen ist die der Strahlungsstärke entsprechende Lichtstärke ein der Größe nach unbekannter, von der spektralen Zusammensetzung abhängiger, physiologisch beeinflußter Bruchteil der Strahlungsstärke; sie läßt sich also nicht in absolutem Maße messen. Es ergibt sich vom theoretischen Standpunkte aus für die Einheit der Lichtstärke, mit welcher wir alle anderen Lichtstärken vergleichen wollen, dementsprechend folgende Bedingung:

1. Als *Einheit der Lichtstärke* [*Lichteinheit* oder *Lichtmaß*[1])] ist jede Lichtstärke zu wählen, wofern sie *reproduzierbar*, d. h. an allen Orten und von jedem Beobachter in der gleichen Stärke herstellbar ist.

Soll die Lichteinheit auch *praktisch* verwertbar sein, so muß sie sich ferner *leicht* reproduzieren lassen; mit anderen Worten: die zu ihrer Darstellung dienende Vorrichtung, welche wir als *Einheitslampe*[1]) bezeichnen wollen, muß sich durch Einfachheit der Konstruktion und Handhabung auszeichnen.

Ferner werden von einzelnen Photometrikern noch die beiden folgenden Bedingungen aufgestellt:

2. Die Lichtstärke muß möglichst groß sein.

3. Die Farbe muß mit derjenigen der gebräuchlichsten Lichtquellen möglichst übereinstimmen.

Die Bedingung 2 ist nur unwesentlich, da man zweckmäßigerweise laufende Messungen nicht mittels der Einheitslampe, sondern mittels einer konstanten Zwischenlichtquelle ausführt. (Näheres s. § 71.) Je nach Bedarf kann man also eine Zwischenlichtquelle von mehr oder minder großer Lichtstärke wählen.

Die Erfüllung der Bedingung 3 ist zwar wünschenswert; jedoch übt eine sich beim Vergleich mit den gewöhnlichen Lichtquellen etwa einstellende Farbendifferenz bei einem richtig konstruierten Photometer keinen wesentlich störenden Einfluß aus. (Vgl. § 106 e.)

Zur Darstellung einer Lichteinheit verwendet man *Flammen* und *feste glühende Körper*; die hierzu benutzten Lampen wollen wir *Flammen-* und *Glühkörper-Einheitslampen* nennen.

§ 40. Bedingungen für Flammen-Einheitslampen.

Die Lichtstärke der in unseren gewöhnlichen Lichtquellen leuchtenden Flammen (Kerzenflamme usw.) ist — vollkommene Verbrennung vorausgesetzt — bedingt durch die Menge des in feinstem Zustande in der Flamme ausgeschiedenen glühenden Kohlenstoffs und durch die Temperatur, welche bei der Verbrennung des betreffenden Kohlenwasserstoffs entsteht. Die Menge dieses Kohlenstoffs hängt von der Natur des Brennstoffs und von den Dimensionen der Flamme, insbesondere von der Flammenhöhe ab. Die Verbrennungstemperatur ist in erster Linie durch die Natur des Brennstoffs bedingt; sie ist z. B. bei Acetylen größer als bei Leuchtgas. Außerdem ist, wie bereits S. 6 bemerkt wurde, die Art der Luftzufuhr (Brennerkonstruktion) von wesentlichem Einfluß. Ferner wird die Temperatur auch durch die Beschaffenheit der umgebenden Luft, insbesondere durch den Gehalt derselben an Wasserdampf und Kohlensäure (vgl. § 50) beein-

---

[1]) Unter „Lichtmaß" wird nicht nur wie oben die Lichteinheit, sondern häufig auch die Einheitslampe verstanden.

flußt. Bei Lampen mit brennendem Dochte spielt auch der letztere eine Rolle. Für Flammen-Einheitslampen ergeben sich dementsprechend folgende Bedingungen:

α) Der Brennstoff muß eine konstante und wohldefinierte chemische Zusammensetzung haben, sich leicht in reinem Zustande gewinnen und ohne Schwierigkeiten auf Reinheit untersuchen lassen.

β) Der Brennstoff muß in einer einfachen Lampe von vorgeschriebenen Dimensionen in sogenannter reiner Luft verbrennen.

γ) Ein brennender Docht ist ganz zu vermeiden.

Die Kerze genügt diesen Bedingungen keineswegs und gibt deshalb sehr schwankende Werte; ja die Lichtstärke der englischen Kerze war im Laufe der Zeit sogar gewachsen, so daß 1894 neue Vorschriften [1]) über die Herstellung und Untersuchung von Kerzenmaterial und Docht notwendig wurden. Die Carcellampe ist nicht viel besser gestellt als die Kerze. Bei der Giroud- und Methvenlampe ist allerdings ein Docht vermieden; allein als Brennstoff wird Leuchtgas benutzt, welches eine unsichere Zusammensetzung hat. Harcourt verwendet deshalb das einheitlichere Pentan und trifft bei den von ihm konstruierten Lampen die Anordnung so, daß ein Docht entweder überhaupt nicht gebraucht wird oder nur zum Emporheben der Flüssigkeit dient, ohne selbst mit der Flamme in Berührung zu kommen. Hefner-Alteneck wählt als Brennstoff das einheitliche Amylacetat, das in einer einfachen Lampe (Hefnerlampe) verbrannt wird; ein Docht ließ sich hierbei nicht vermeiden; allein derselbe verkohlt bei der verhältnismäßig geringen Siedetemperatur des Brennstoffs nur sehr wenig. In neuerer Zeit sind noch Lampen mit anderem Brennstoffe von einfacher Zusammensetzung, z. B. Acetylen, vorgeschlagen worden. Diese Lampen haben sich bisher noch keinen Eingang zu verschaffen vermocht.

§ 41. Bedingungen für Glühkörper-Einheitslampen.

Die Lichtstärke von festen, infolge ihrer hohen Temperatur leuchtenden Glühkörpern hängt gemäß dem Kirchhoffschen Gesetze von ihrer Temperatur und ihrem Absorptionsvermögen bei jener Temperatur und außerdem noch von der Größe ihrer strahlenden Oberfläche ab. Für Glühkörper-Einheitslampen sind dementsprechend folgende Bedingungen zu erfüllen:

α) Die Glühkörper dürfen ihre Strahlungseigenschaften auch bei hohen Temperaturen nicht ändern, sie müssen also bei der gleichen Temperatur immer die gleiche Lichtstärke besitzen.

β) Die Glühkörper müssen auf eine bestimmte, jederzeit wieder herstellbare Temperatur erhitzt werden.

---

[1]) J. f. G. u. W. 37, 128 (1894).

γ) Die strahlende Oberfläche muß eine genau bestimmte Größe haben.

Der Bedingung α) genügt z. B. chemisch reines Platin. Eine immer gleiche Glühtemperatur ließ sich bisher noch nicht auf einfache Weise herstellen, so daß wenigstens vorläufig noch der Anwendung von Flammen der Vorzug zu geben ist. Der Bedingung γ) wird durch Benutzung von *Blenden* genügt. Die Blende ist dann (S. 94) der Ort der Lichtquelle und wirkt so, als ob sie mit der Masse des leuchtenden Körpers belegt wäre. Damit sich die Blendenöffnung infolge der starken Wärmeausstrahlung des Glühkörpers nicht ändert, wird der Schirm doppelwandig hergestellt und durch eine Wasserspülung auf konstanter Temperatur erhalten.

B. Flammen-Einheitslampen.

I. Ältere Dochtlampen.

§ 42. Die Kerze.

Die Kerze ist die älteste, aber auch die unvollkommenste aller Einheitslampen. In Deutschland ist sie schon seit langem durch die Hefnerlampe nahezu verdrängt. Auch in Amerika hat sie seit 1897 auf Empfehlung des American Institute of Electric Engineers, wenigstens in elektrotechnischen Kreisen, der Hefnerlampe weichen müssen. In England ist die englische Kerze noch bis heute gesetzlich vorgeschrieben gemäß der Metropolis Gas Act of 1860 und den Gas Works Clauses Amendment Act of 1871; aber auch dort dürfte sie bald von der Bildfläche verschwinden, da die Metropolitan Gas Referees zu London bei ihren 1898 herausgegebenen Vorschriften für die Londoner Gasprüfungsämter *die 10-Kerzen-Pentanlampe von Harcourt* (§ 55) als Einheitslampe angenommen haben. Die Kerze hat also heute nur noch ein untergeordnetes praktisches Interesse und soll deshalb auch nur mit wenigen Worten behandelt werden.

Die in Betracht kommenden Kerzen sind die folgenden:

a) Die englische Walratkerze (London Standard Spermaceti Candle) wird nach den 1894 herausgegebenen Vorschriften aus dem echten Walrat verfertigt, welches in England selbst aus dem rohen Walratöl des Spermwals hergestellt ist. Der Schmelzpunkt des gereinigten Kerzenmaterials soll zwischen 44 und 46° C liegen. Zur Erzielung dieses Schmelzpunktes ist nötigenfalls bestes, an der Luft gebleichtes, bei 62° C schmelzendes Bienenwachs innerhalb bestimmter Grenzen zuzusetzen.

Die richtig hergestellte Kerze soll möglichst genau $^1/_6$ Pfund englisch (72,3 g) wiegen; der Durchmesser soll unten 22,5, oben 20 mm

betragen; der Docht ist aus drei Strängen mit je 18 Baumwollfäden geflochten.

In England läßt man die Kerze ungestört brennen. Die Lichtstärke wird als normal (= 1) angesehen, wenn der stündliche Verbrauch 120 grains (7,78 g) beträgt. Liegt der Verbrauch zwischen 114 und 126 grains (7,39 bis 8,17 g), so wird die Lichtstärke dem Verbrauch proportional gesetzt. Beträgt bei der Messung der auf die Stunde berechnete Verbrauch z. B. 123 grains, so wird die Lichtstärke der Kerze gleich $^{123}/_{120}$ gesetzt. Wurde bei dieser Messung die Lichtstärke der zu messenden Lampe z. B. gleich 10 (scheinbaren) englischen Kerzen gefunden, so wird ihre wirkliche Lichtstärke gleich

$$10 \cdot \frac{123}{120} = 10{,}25 \text{ englische Kerzen}$$

angenommen; mit anderen Worten: es werden dann die Resultate proportional zum Konsum korrigiert.

Beträgt der Verbrauch weniger als 114 oder mehr als 126 grains, so wird die Messung verworfen.

Zur Bestimmung des Kerzenverbrauches hat Krüss eine selbsttätige Wage konstruiert, welche der Deleuilschen Carcellampenwage ähnlich ist.

Die Bestimmung der Lichtstärke nach Gewichtsverbrauch ist natürlich sehr ungenau. In Deutschland wird deshalb die englische Kerze bei einer Flammenhöhe von 45 mm gemessen, wobei sie von Zeit zu Zeit geputzt (geschneuzt) wird.

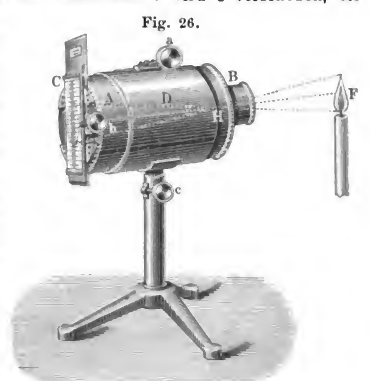
b) Die deutsche Vereins-Paraffinkerze wird seit 1868 unter Aufsicht der Lichtmeßkommission des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern nach genauen Vorschriften hergestellt, deren Einhaltung ein gleichmäßiges Fabrikat garantieren soll. Sie hat eine zylindrische Gestalt von 20 mm Durchmesser und wird in einer solchen Länge hergestellt, daß sie 50 g wiegt. Der Docht soll möglichst gleichförmig aus 24 Baumwollfäden geflochten sein und in trockenem Zustande, auf das laufende Meter gerechnet, 0,668 g wiegen. Der Schmelzpunkt des Kerzenmaterials, welches aus reinem Paraffin, nötigenfalls unter Zusatz von 10 bis 15 Proz. Stearin, hergestellt wird, soll 55° betragen. Die normale Flammenhöhe beträgt 50 mm. Die Kerze ist durch einen in den Docht eingelegten roten Faden von anderen Kerzen unterschieden.

c) Die Münchener Stearinkerze, welche im Kontrakt zwischen der Stadt München und den Münchener Gaswerken vorgeschrieben war, ist unten 23 mm, oben 20,5 mm stark und 310 mm lang. Vorgeschrieben ist eine Flammenhöhe von 52 mm.

d) Die Bougie de l'Etoile, welche früher vielfach in Frankreich angewandt wurde, ist jetzt nicht mehr im Gebrauch.

Die Messung der Flammenhöhe wird, falls man kein Kathetometer zur Verfügung hat, am besten mittels eines *optischen Flammenmessers nach Krüss*[1]) (Fig. 26) ausgeführt, bei welchem durch das achromatische Objektiv *B* ein Bild der ganzen Flamme auf der mit einer Millimeterteilung versehenen Mattglasscheibe *C* in natürlicher Größe entworfen wird. *B* und *C* befinden sich an den Enden des horizontalen Rohres *A*. Durch den Zahntrieb *c* wird das Rohr *A* so lange in der Höhe verstellt, bis seine optische Achse ungefähr durch die Flammenmitte geht; mittels des Zahntriebes *a* wird *A* in seiner Hülse *D* verschoben, bis ein scharfes Flammenbild auf der Mattglasscheibe *C* entsteht. Mittels des Zahntriebes *b* wird *C* verschoben, bis der Flammengrund, d. h. die Stelle, wo der Docht anfängt schwarz zu werden, mit dem Nullpunkt der Teilung zusammenfällt. Brennt die Kerze herunter, so muß man den Apparat mittels des Triebes *c* allmählich tiefer stellen, damit das Flammenbild stets nahezu symmetrisch zur optischen Achse des Objektivs bleibe.

Fig. 26.



Die Bestimmung der Flammenhöhe wird sehr unsicher, sobald der Flammengrund durch einen Wall des Kerzenmaterials, der sich um den Docht bildet, verdeckt wird. Zuweilen lassen sich wegen starker Zackenbildung an dem oberen Ende der Flamme Messungen überhaupt nicht ausführen.

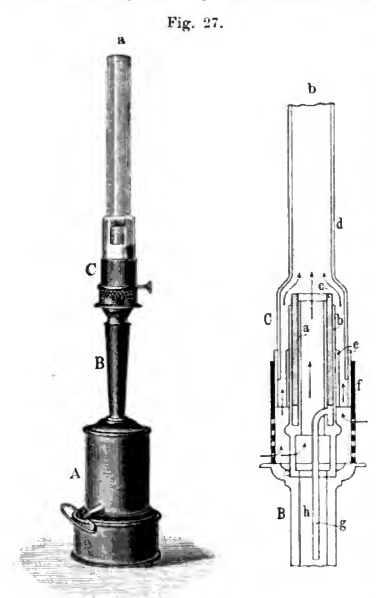
§ 43. Die Carcellampe, Keateslampe und Pigeonlampe.

a) Carcellampe. Fig. 27 a (a. f. S.) gibt eine perspektivische Ansicht der ganzen Lampe, Fig. 27 b einen Schnitt durch den oberen Teil der Lampe. Der wichtigste Teil ist ein nach Argandschem Prinzip der doppelten Luftzufuhr hergestellter Rundbrenner *C* (S. 6), bestehend aus den beiden konzentrischen Brennerrohren *a* und *b*, zwischen welchen der Docht *c* mittels Zahntriebes in der Höhe verstellbar ist. Der Glaszylinder *d* wird auf einen Anschlag des ringförmigen Rohres *e* gesetzt, welches sich längs *b* in der Höhe verstellen läßt. Die Brennergalerie *f* ist mit Löchern versehen, durch welche die Verbrennungsluft, wie von

[1]) J. f. G. u. W. 26, 717 (1883).

den Pfeilen angedeutet wird, der Flamme von außen und innen zugeführt wird. Die Lampe wird mit gereinigtem Colzaöl (Sommerrapsöl) gespeist, welches aus dem im Fuße *A* befindlichen Behälter mittels eines Pumpwerkes im Überschuß zum Dochte emporgeführt wird. Die Pumpe wird durch ein Uhrwerk betrieben, dessen Schlüssel in Fig. 27a zu sehen ist. In den Zwischenräumen *h* des Zwischenstückes *B* fließt die überschüssige Flüssigkeit wieder zum Behälter zurück.

Fig. 27.



Die Carcellampe wurde 1842 in Frankreich auf Empfehlung von Dumas und Regnault eingeführt; dieselben stellten hierbei eine Reihe von Vorschriften auf, von denen die wichtigsten die folgenden sind:

Die lichte Weite des Brennerrohres *b* soll 23,5 mm betragen.

Der Docht soll 10 mm aus dem Dochtrohre *b* hervorragen.

Die Einschnürung des Zylinders soll sich 7 mm über dem Rande des Dochtes, also 17 mm über dem oberen Dochtrohrrande befinden.

Zu benutzen ist der sogenannte Leuchtturmdocht, der aus 75 Strängen gewebt ist und auf das laufende Decimeter Länge 3,6 g wiegt.

Zu jeder Messung ist ein neuer Docht zu verwenden und die Lampe bis zur Galerie hinauf mit neuem Öl zu füllen.

Die Lichtstärke soll als normal angesehen werden, wenn der stündliche Ölverbrauch 42 g beträgt. Bleibt der letztere zwischen 39 und 45 g, so soll die Lichtstärke wie bei der Kerze proportional zum Verbrauch korrigiert werden. Wird der Ölverbrauch kleiner als 39 g oder größer als 45 g, so ist die Messung zu verwerfen.

Nach den Untersuchungen von Laporte (§ 67) beträgt bei Einhaltung der vorgeschriebenen Dimensionen der stündliche Verbrauch

mehr als 45 g. Derselbe liegt erst dann zwischen 41 und 43 g, wenn die Länge des aus dem Brenner herausragenden Dochtes 7 bis 8 mm (statt 10 mm) und die Höhe der Zylindereinschnürung über dem oberen Dochtrande wieder 7 mm beträgt, wenn also die Zylindereinschnürung 14 bis 15 mm (statt 17 mm) oberhalb der Oberkante des Brenners *b* liegt. Verfasser hat diese Beobachtung bestätigt gefunden.

Die Lichtstärke nimmt infolge der allmählichen Erwärmung der Lampenteile in der ersten halben Stunde verhältnismäßig schnell, dann eine mehr oder minder lange Zeit immer langsamer zu, während der Ölverbrauch fortwährend hin und her schwankt. Für gewöhnlich führt man etwa 45 Minuten nach dem Anzünden eine einzige Messung, bestehend aus einer Konsumbestimmung und einer Anzahl von photometrischen Einstellungen aus. Um einen möglichst zuverlässigen Wert zu erhalten, sollte man indessen mehrere Messungen unmittelbar hintereinander machen, also eine *Messungsreihe* ausführen und aus den korrigierten Lichtstärkenwerten das Mittel nehmen.

Der Ölverbrauch wird aus der Zeit berechnet, welche zur Verbrennung einer gewissen Flüssigkeitsmenge (10 g) erforderlich ist. In Frankreich benutzt man gewöhnlich die selbsttätige Wage von Deleuil, welche den Anfang und das Ende dieser Zeit durch ein Glockenzeichen angibt.

Die Lampe ist wenig genau (vgl. S. 104 und § 67). Überdies ist auch die Anwendung eines die Flamme umgebenden Zylinders bedenklich, da derselbe einen unsicheren Lichtverlust veranlaßt. Die Carcellampe eignet sich daher wenig als Einheitslampe, was jetzt auch von hervorragenden französischen Photometrikern, z. B. Blondel[1]), zugestanden wird.

b) Die Keateslampe, welche ausschließlich in England benutzt wird, ist eine mit Paraffinöl gespeiste Carcellampe.

c) Die Pigeonlampe, welche in seltenen Fällen noch in Frankreich benutzt wird, ist eine mit Gasolin gespeiste Dochtlampe.

II. Mit Leuchtgas gespeiste Lampen.

§ 44. Die Methvenlampe.

Methven[2]) glaubte 1878 gefunden zu haben, daß die Flamme des gewöhnlichen Leuchtgases, wenn es in einem Argandbrenner bei einer Flammenhöhe von 3 Zoll englisch verbrannt wird, in ihrem hellsten Teile gleichmäßig leuchtet und daß hier die Helle (Lichtstärke pro Flächeneinheit) von der Beschaffenheit des Leuchtgases unabhängig sei. Dementsprechend stellte er vor diesen hellsten Teil eine recht-

[1]) L'Éclair. électr. **8**, 341 (1896).
[2]) J. of Gas Lighting **32**, 94 (1878). J. f. G. u. W. **22**, 42 u. 690 (1879).

eckige Blende, den sogenannten Methvenschlitz, dessen Abmessungen er so groß wählte, daß die Lichtstärke der ausgeblendeten Flamme (S. 94) nach seinen Messungen stets zwei englische Kerzen betrug.

Da sich die Lichtstärke jedoch als von der Beschaffenheit des Leuchtgases abhängig[1]) erwies, verwandte Methven später[2]) mit Gasolindämpfen karburiertes Leuchtgas. Aber auch mit dem aufgebesserten Leuchtgase vermochte er nach entsprechender Änderung der in Betracht kommenden Abmessungen keine konstante Lichtstärke von zwei englischen Kerzen zu erzielen, da das Gasolingas in seiner Zusammensetzung denselben Änderungen wie das Gasolin selbst unterworfen ist. Ein weiterer Übelstand ist die Anwendung eines Zylinders, und der Umstand, daß der hellste Flammenteil nicht vollständig gleichmäßig leuchtet, so daß eine genaue Justierung der Blende nötig ist. Die Lampe ist also nicht zur Einheitslampe, sondern nur zur Zwischenlichtquelle (S. 71) geeignet. Nichtsdestoweniger findet sie in England noch vielfach als Einheitslampe sowohl unter Benutzung von gewöhnlichem als auch karburiertem Leuchtgas Verwendung.

Fig. 28.

Fig. 28 zeigt die Lampe in ihrer noch heute gebräuchlichen Gestalt. Vor den Argandbrenner *a* ist der vertikale Metallschirm *bb* gestellt, in welchem sich ein Schlitten mit den beiden Blenden *c* und *d* horizontal verschieben läßt, so daß *c* und *d* nacheinander vor den hellsten Teil der Flamme gebracht werden können. *ee* und *ff* sind zwei Visiere zum Einstellen der Flammenhöhe auf 3 bzw. 2,5″ engl. Für gewöhnliches Leuchtgas werden die Blende *c* und das Visier *ee*, für karburiertes Leuchtgas die Blende *d* und das Visier *ff* benutzt.

Die Edgertonlampe[3]), welche in vielen amerikanischen Gaswerken benutzt wird, ist eine abgeänderte Methvenlampe, bei welcher der die Blendenöffnung tragende ebene Schirm durch einen Metallzylinder ersetzt ist, der in einer bestimmten Höhe einen horizontalen Ausschnitt trägt.

§ 45. Die Giroudlampe.

Die von Giroud[4]) 1882 vorgeschlagene Lampe besteht aus einem Einlochbrenner mit einer kreisrunden Öffnung von 1 mm Durchmesser. Sie wird mit gewöhnlichem Leuchtgase gespeist, das durch einen im

---

[1]) Report of the London Board of Trade; J. of Gas Lighting **38**, 720 (1881).

[2]) J. of Gas Lighting **40**, 42 (1882).

[3]) Vgl. J. f. G. u. W. **43**, 938 u. 958 (1900). Früher benutzte Edgerton eine ausgeblendete Kerosinölflamme.

[4]) J. des usines à gaz. Mai 1882; J. f. G. u. W. **26**, 213 (1883).

Fuße der Lampe angebrachten Gasdruckregulator (Photorheometer) hindurchgeht.

Die Lichtstärke bei einer Flammenhöhe von 67,5 mm sollte nach Giroud unabhängig von der Beschaffenheit des Leuchtgases 0,1 Carcel betragen. Ferner sollte zwischen der Lichtstärke J und der Flammenhöhe h für h zwischen 45 und 120 mm die einfache Beziehung bestehen

$$J = 0{,}1 + (h - 67{,}5)\ 0{,}0022 \text{ Carcel.}$$

Wenn sich die Flammenhöhe um 1 mm ändert, so würde sich demnach die Lichtstärke um 0,0022 Carcel, mithin in der Nähe der normalen Flammenhöhe von 67,5 mm um 2,2 Proz. ändern.

Dagegen fand Uppenborn[1]), daß die Lichtstärke nicht lediglich von der Flammenhöhe, sondern auch noch, und zwar im hohen Maße, von der Zusammensetzung des Leuchtgases abhängig ist, und daß die von Giroud behauptete Proportionalität zwischen Lichtstärke und Flammenhöhe nicht besteht. Die Giroudlampe eignet sich also nicht zur Darstellung der Lichteinheit, sondern ist nur als Zwischenlichtquelle zu benutzen.

III. Die Hefnerlampe.

§ 46. Definition der Lichteinheit und Allgemeines.

1884 schlug v. Hefner-Alteneck[2]) als technisches Lichtmaß die Lichtstärke einer in ruhig stehender, reiner atmosphärischer Luft frei brennenden Flamme vor, welche aus dem Querschnitt eines massiven, mit Amylacetat gesättigten Dochtes aufsteigt, der ein kreisrundes Dochtröhrchen aus Neusilber von 8 mm innerem und 8,3 mm äußerem Durchmesser und 25 mm freistehender Länge vollkommen ausfüllt, bei einer Flammenhöhe von 40 mm vom Rande des Dochtröhrchens aus und frühestens 10 Minuten nach dem Anzünden gemessen.

Diese Lichteinheit wurde ursprünglich nach dem Vorschlage des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern *Hefnerlicht* genannt. Statt dessen ist seit 1896 von dem Deutschen Verein von Gas- und Wasserfachmännern und dem Verbande Deutscher Elektrotechniker in möglichster Anlehnung an die Genfer Beschlüsse (§ 69 und 70) der Name **Hefnerkerze mit der Abkürzung** HK gewählt worden.

Die *Hefnerlampe* — so wird die zur Darstellung der Hefnerkerze dienende Lampe nach dem Vorschlage der Reichsanstalt genannt — ist nach allen Richtungen hin gründlich untersucht. Dabei zeigte sich, daß sie den älteren Einheitslampen weit überlegen ist und allen billigen

---

[1]) Ber. d. elektrot. Versuchsstation München 1888, Nr. 10.

[2]) E. T. Z. 5, 20 (1884); J. f. G. u. W. 27, 73 (1884); 29, 3 (1886); 30, 489 (1887).

Ansprüchen genügt. Es ergab sich nämlich, daß zwei Hefnerlampen von vorgeschriebenen Abmessungen, in der gleichen Luft gebrannt, stets die gleiche Lichtstärke besitzen. Seit Juli 1893 wird die Hefnerlampe von der Reichsanstalt beglaubigt. Die Prüfungsbestimmungen sind im Zentralblatt für das Deutsche Reich 1893, S. 124, erschienen und etwas später mit einer erläuternden Einleitung, sowie mit einer ausführlichen Beschreibung der Lampe und mit den Vorschriften für den Gebrauch der Lampe im Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung **36**, 341 (1893), sowie in der Zeitschrift für Instrumentenkunde **13**, 257 (1893) veröffentlicht. Diese Publikation ist mit Ausschluß der Einleitung im Anhang 5 in extenso abgedruckt. Aus diesem Grunde soll im folgenden Paragraphen nur eine kurze Beschreibung der Lampe gegeben werden.

Bis zum Schlusse des Jahres 1905 sind im ganzen 1307 Hefnerlampen beglaubigt, wie aus nachstehender Tabelle hervorgeht, in welcher *V* Visier, *O* optischer Flammenmesser, *R* Reservedochtrohr bezeichnet.

Zusammenstellung der in der Reichsanstalt beglaubigten Hefnerlampen (vom 3. Juli 1893 bis 31. Dezember 1905).

Jahr	*V*	*O*	*VO*	*VR*	*OR*	*VOR*	Summe
1893	23	25	23	—	3	8	82
1894	3	32	3	—	6	12	56
1895	26	32	3	—	12	5	78
1896	21	37	1	—	12	—	71
1897	24	52	5	—	18	3	102
1898	21	41	—	—	19	3	84
1899	57	50	8	—	31	3	149
1900	19	46	5	—	24	6	100
1901	50	60	10	—	11	6	137
1902	57	47	15	—	10	6	135
1903	17	42	16	—	25	5	105
1904	26	47	9	1	20	6	109
1905	31	38	4	—	23	3	99
	375	549	102	1	214	66	1307

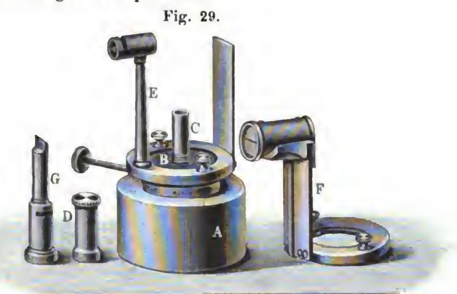
§ 47. Kurze Beschreibung der Lampe.

Die eigentliche Lampe (Fig. 29) besteht aus dem Flüssigkeitsbehälter *A*, dem die Dochtführung enthaltenden Brennerkopf *B* und dem neusilbernen Dochtrohr *C*. Neusilber wurde gewählt, weil diese Legierung großen Widerstand gegen Formveränderung bietet und nicht rostet. Nach dem Gebrauch wird der Deckel *D* über das Dochtrohr geschraubt.

Zur Eintstellung der vorgeschriebenen Flammenhöhe dienen das Visier nach v. Hefner-Alteneck *E* und der optische Flammenmesser [1]) nach Krüss *F* (vgl. Fig. 26, S. 107).

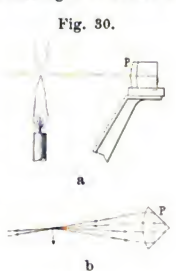
Brodhun und der Verfasser haben zwei Flammenmesser konstruiert, bei welchen ein reelles oder virtuelles Bild einer Marke am Orte der Flammenspitze erzeugt wird; sie haben jedoch auf die Einführung dieser Flammenmesser verzichtet, um nicht die Beglaubigungsvorschriften unnötig zu komplizieren.

Fig. 29.



Von F. F. Martens [2]) ist ein Flammenmesser (Fig. 30 a und b) vorgeschlagen, bei welchem mittels eines rechtwinkeligen Prismas *P*, dessen Hypotenusenfläche sphärisch angeschliffen ist, ein umgekehrtes reelles Bild der Flamme über der wirklichen Flamme erzeugt wird. Die Flamme hat die richtige Höhe, wenn sich die wirkliche und gespiegelte Flammenspitze berühren. Ein Hauptübelstand dieses Flammenmessers ist, daß auf das Zusammenstoßen von zwei unscharfen Grenzen eingestellt werden muß, während die übrigen Flammenmesser wenigstens eine scharfe Grenze (die untere Ebene eines Visierblättchens oder den oberen Rand der Marke bzw. des reellen oder virtuellen Markenbildes) besitzen.

Fig. 30.



Die Lehre *G* (Fig. 29) dient zur Kontrolle der richtigen Stellung des oberen Dochtrohrrandes sowie derjenigen des Flammenmessers.

§ 48. Einfluſs des Brennstoffs.

Das Amylacetat (Essigsäure-Isoamyläther, $C_7H_{14}O_2$, Siedepunkt zwischen 138 und 140°) ist eine wasserhelle, stark nach Bergamotte-

[1]) J. f. G. u. W. **30**, 817 (1887).

[2]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. **2**, 108 (1900); J. f. G. u. W. **43**, 582 (1900).

birnen riechende Flüssigkeit, die in freier Luft im allgemeinen mit nicht rußender, rötlicher Flamme verbrennt. Es wird aus reinem Gärungsamylalkohol (Siedepunkt zwischen 129 und 133°), konzentrierter Schwefelsäure und Eisessig (Siedepunkt zwischen 117 und 119°) gewonnen. Bei nicht sorgfältiger Herstellung enthält Amylacetat noch Amylalkohol, Diamylen, Isobutylacetat, Essigsäure und Wasser. Außerdem kommen im Handel geringwertigere Sorten vor, welche für andere Zwecke bestimmt sind und dann mit namhaften Mengen fremder Stoffe (z. B. für die Anfertigung von Fruchtbonbons mit gewöhnlichem Äthylalkohol) versetzt sind.

Die ersten Versuche über den Einfluß des Brennstoffs wurden vom Verfasser[1]) im Hamburgischen Physikalischen Staatslaboratorium ausgeführt. Später wurden die Versuche von ihm gemeinsam mit Brodhun in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt fortgesetzt. Über die letzteren Untersuchungen haben Löwenherz[2]) und v. Hefner-Alteneck[3]) berichtet.

Ergebnisse:

Das aus zuverlässigen Handlungen in Deutschland bezogene Amylacetat liefert mit reinem Amylacetat übereinstimmende Werte.

Die häufigsten Verunreinigungen üben, da sie nur in verhältnismäßig geringen Mengen vorkommen, einen nur unwesentlichen Einfluß aus.

Ferner ließen sich auf Grund dieser Versuche einfache, größtenteils von Bannow herrührende Prüfungsmethoden (s. Anhang 5) angeben, durch welche man imstande ist, nicht sorgfältig hergestelltes oder absichtlich verunreinigtes Amylacetat zu erkennen.

Das Amylacetat ist der Vorsicht halber gut verkorkt im Dunkeln aufzubewahren. Alsdann ist eine Zersetzung während des Aufbewahrens und Brennens nicht zu befürchten. Jedoch selbst eine lange andauernde Belichtung übt auf gutes, als probemäßig befundenes Amylacetat keinen allzu großen Einfluß aus, wie zwei Proben zeigten, welche seitens der Reichsanstalt mehrere Jahre in verkorkten Flaschen vor ein Fenster gestellt, also allen Witterungsverhältnissen, namentlich der direkten Sonnenbestrahlung und der Kälte ausgesetzt waren. Die eine Probe ergab nach einem Jahre eine Lichtschwächung von 1,2 Proz.; nach $5^1/_2$ Jahren eine solche von 4,3 Proz.; sie hatte inzwischen einen unangenehmen Geruch angenommen und reagierte stark sauer. Die andere Probe war nach vier Jahren nur schwach sauer, roch nicht auffallend und ergab eine Schwächung der Lichtstärke um 0,7 Proz.

---

[1]) E. T. Z. 9, 478 (1888).
[2]) J. f. G. u. W. 34, 509 (1891).
[3]) Ebenda 34, 349 (1891).

§ 49. Einfluſs der Flammenhöhe sowie der Dochtrohrabmessungen und des Dochtrohrmaterials.

a) Flammenhöhe.

Setzt man die Lichtstärke bei der vorgeschriebenen Flammenhöhe $h = 40$ mm gleich 1, so findet man nach dem Verfasser[1]) für h in der Nähe von 40 mm die Lichtstärke J aus h durch die lineare Gleichung

$$J = 1 + 0{,}027\,(h - 40).$$

Eine Änderung der Flammenhöhe um 1 mm entspricht also in der Nähe von 40 mm eine Änderung der Lichtstärke um nahezu 3 Proz. Demnach müssen die Flammenmesser sehr genau zeigen.

b) Abmessungen des Dochtrohres.

Verfasser[2]) fand, daß man bezüglich der lichten Weite und der Länge des Dochtrohres nicht allzu ängstlich zu sein braucht. Dagegen spielt die Wandstärke eine wichtige Rolle, wie Lummer und Brodhun[3]) beim Vergleich von Hefnerlampen verschiedener Herkunft feststellten.

Hier sowie unter c) mögen die bisher noch nicht veröffentlichten Ergebnisse von Versuchen mitgeteilt werden, die Verfasser mit Brodhun schon vor längerer Zeit in der Reichsanstalt angestellt hat.

α) Bei einer Wandstärke von rund	0,20	0,25	0,30	0,40 mm
ist die Lichtstärke um . .	0,4	1,8	2,8	4,1 Proz.

kleiner als bei der vorgeschriebenen Wandstärke von 0,15 mm. Offenbar rührt die Lichtabnahme daher, daß sich durch die bessere Wärmeableitung die Flamme abkühlt. Dochtrohre, deren Wandstärke kleiner als 0,15 mm ist, also zu dünne Dochtrohre, ergeben dagegen die normale Lichtstärke.

β) Lampen mit zu dünnen Dochtrohren brennen außerordentlich unruhig, d. h. mit stark schwankender Flammenhöhe. Lampen mit Dochtrohren von mindestens 0,25 mm Wandstärke brennen sehr ruhig; im Verlaufe von mehreren Stunden ändert sich die Flammenhöhe oft nur um 0,2 mm.

γ) Bei normalwandigen und zu dünnen Dochtrohren bleibt die obere Kante des Dochtes bei Einstellung auf die vorgeschriebene Flammenhöhe stets im Dochtrohre. Bei zu starken Dochtrohren muß

---

[1]) E. T. Z. 9, 96 (1888). Die oben angegebene Gleichung ergibt sich aus den beiden a. a. O. mitgeteilten.

[2]) J. f. G. u. W. 30, 814 (1887).

[3]) Z. f. Instrk. 10, 119 (1890).

der Docht herausgeschraubt werden, und zwar beträgt die Länge des herausragenden Dochtes bei einer

Wandstärke von rund	0,20	0,25	0,30	0,40 mm
im Mittel	0,4	0,6	0,7	0,9 „

c) Dochtrohrmaterial.

Mit einem silbernen Dochtrohr von normaler Länge ergibt sich bei

einer Wandstärke von rund 0,11 mm
eine um . . . . 5 Proz. kleinere

Lichtstärke als mit einem normalen Dochtrohr aus Neusilber.

Das Dochtrohrmaterial beeinflußt also die Lichtstärke wesentlich. Nun ist Neusilber eine nur annähernd bestimmte Legierung. Die bisherigen langjährigen Prüfungen der Reichsanstalt sowohl vor wie nach der Beglaubigung ergaben jedoch das erfreuliche Resultat, daß neusilberne Dochtrohre von vorgeschriebenen Abmessungen stets dieselben Lichtstärkenwerte lieferten. Das Ergebnis des Versuches mit dem silbernen Dochtrohr ist jedoch insofern von Interesse, als es zeigt, daß für die Beglaubigung der Hefnerlampe außer einer mechanischen Prüfung, welche sich auf die Abmessungen und die Konstruktion erstreckt, auch noch eine photometrische auszuführen ist.

§ 50. Einfluſs der umgebenden Luft.

Zur Vergleichung dienten für diese vom Verfasser[1]) ausgeführten Untersuchungen, wie für alle Messungen der Reichsanstalt, eine Reihe von konstanten elektrischen Glühlampen (S. 153); elektrische Glühlampen besitzen außer anderen Vorzügen auch den, daß ihre Lichtstärke von atmosphärischen Einflüssen unabhängig ist.

a) Einfluß der Feuchtigkeit.

Definition der Feuchtigkeit. Gewöhnlich wird die absolute Feuchtigkeit dem Gewichte nach als die in 1 cbm Luft enthaltene Wassermenge in Gramm definiert. Im vorliegenden Falle wird sie mit Rücksicht auf die physikalischen Vorgänge in der Flamme dem Volumen nach, und zwar als der in Litern ausgedrückte Raum x definiert, den der auf 1 cbm trockene, kohlensäurefreie Luft kommende Wasserdampf bei der gleichen Temperatur und dem gleichen Drucke wie die Luft einnehmen würde. Bezeichnet

b den Barometerstand,
e die Spannung des Wasserdampfes der Luft,
e_1 die Spannung der Kohlensäure der Luft,

---

[1]) Z. f. Instrk. 15, 157 (1895); J. f. G. u. W. 38, 505 (1895); Z. f. Bel. 1, 295 (1895); auszugsweise E. T. Z. 16, 655 (1895).

so ist demnach die Feuchtigkeit

$$x = 1000 \cdot \frac{e}{b - e - e_1} \quad \text{. . . . . . . 1)}$$

wofür sich bei Beobachtungen in sog. reiner Luft (S. 119 und 120), da alsdann e_1 gegen e zu vernachlässigen ist, auch schreiben läßt

$$x = 1000 \cdot \frac{e}{b - e} \quad \text{. . . . . 1 a)}$$

e wird am besten mittels des Aßmannschen Aspirationspsychrometers nach der Sprungschen Formel

$$e = e' - \tfrac{1}{2}(t - t') \cdot \frac{b}{755} \quad \text{. . . . . . . 2)}$$

gefunden, in welcher t die Temperatur des trockenen, t' die Temperatur des feuchten Thermometers, e' die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes bei der Temperatur t' bezeichnet (s. Tab. III, Anhang).

A. Tafel der Schwankungen der Feuchtigkeit und Lichtstärke der Hefnerlampe im Laufe eines Jahres.

Monat	Feuchtigkeit			Lichtstärke		
	Mittel	Minim.	Maxim.	Mittel	Maxim.	Minim.
1894						
April	9,14	6,91	12,05	0,999	1,012	0,980
Mai	10,29	6,98	16,37	0,994	1,009	0,959
Juni	12,31	8,94	14,83	0,979	1,005	0,959
Juli	14,43	11,48	18,48	0,970	0,988	0,948
August	13,35	11,94	16,50	0,972	0,981	0,956
September	11,07	8,16	15,43	0,986	1,001	0,958
Oktober	10,44	8,51	12,52	0,991	1,016	0,977
November	8,87	6,13	12,11	1,000	1,017	0,977
Dezember	7,18	6,05	8,18	1,009	1,021	1,001
1895						
Januar	6,11	3,27	8,24	1,016	1,033	1,006
Februar	5,25	3,18	6,95	1,019	1,033	1,005
März	6,77	4,71	8,13	1,010	1,022	1,002

B. Tafel der Monatsmittel der Lichtstärke der Hefnerlampe im Laufe mehrerer Jahre.

Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	Septbr.	Oktober	Novbr.	Dezbr.
1,014	1,014	1,011	1,007	1,000	0,990	0,978	0,977	0,988	0,993	1,002	1,010

Messungsergebnisse. Mehrjährige Beobachtungen, welche unter Benutzung eines Kathetometers und eines Aßmannschen Aspirationspsychrometers *in einem gut gelüfteten, hinreichend großen Zimmer* ausgeführt wurden, führten zu folgendem Ergebnis:

1. Die Feuchtigkeit schwankt im Laufe eines Jahres zwischen etwa 3 Liter (an kalten Wintertagen mit Ostwinden) und 18 Liter (an heißen Sommertagen mit Westwinden). Dieser Schwankung entspricht eine Schwankung der Lichtstärke von im ganzen 8,5 Proz., und die Abweichung von dem Mittelwert derjenigen Lichtstärken, welche eine größere Anzahl von Hefnerlampen innerhalb mehrerer Jahre zeigten, beträgt im Mittel $\pm$ 1,8 Proz.

Ein übersichtliches Bild der Schwankungen geben die vorstehenden Tabellen A und B. Als Lichteinheit wurde dabei der eben erwähnte Mittelwert zugrunde gelegt. Die Lichtstärke ist demnach durchschnittlich im Frühjahr und Herbst gleich 1, im Sommer kleiner, im Winter größer als 1.

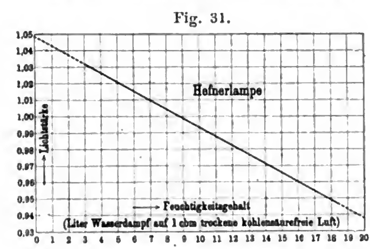
2. Innerhalb des untersuchten Feuchtigkeitsgebietes von 3 bis 18 Liter besteht zwischen der Lichtstärke y und der Feuchtigkeit x die Gleichung

$$y = 1{,}049 - 0{,}0055\,x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

In Fig. 31 ist diese Abhängigkeit graphisch dargestellt.

Mithin nimmt die Lichtstärke mit wachsender Feuchtigkeit stetig ab, und zwar für jedes Liter um 0,0055 der zugrunde gelegten Einheit, d. h. durchschnittlich um 0,55 Prozent.

Fig. 31.



Die nach Gleichung 3) berechneten Lichtstärken weichen von den beobachteten bis zu 0,9 Proz., im Mittel um $\pm$ 0,41 Proz. ab. *Mittels Gleichung 3) läßt sich demnach die Lichtstärke der Hefnerlampe aus der Luftfeuchtigkeit im Mittel bis auf $\pm$ 0,4 Proz. genau berechnen.*

Vervollständigung der Definition der Hefnerkerze.

Die ursprüngliche Definition (S. 111) nahm auf die Luftfeuchtigkeit keine Rücksicht; sie genügt für nahezu alle technischen Zwecke, da die hieraus folgenden Abweichungen im Mittel $\pm$ 1,8 Proz. betragen. Verlangt man eine weitergehende Genauigkeit, so muß man noch festsetzen, für welchen Feuchtigkeitsgehalt man die Lichtstärke der Hefnerlampe gleich 1 nehmen will. Aus praktischen Gründen empfiehlt

es sich, nicht absolute Trockenheit, sondern einen *mittleren* Feuchtigkeitsgehalt zu nehmen. In Wirklichkeit war dies, bevor man die durch Gleichung 3) ausgedrückte Beziehung zwischen Lichtstärke und Feuchtigkeit aufgestellt hatte, seitens der Reichsanstalt schon dadurch geschehen, daß sie alle ihre Messungen auf den oben erwähnten mehrjährigen Mittelwert der Lichtstärken als Einheit bezog. Dieser Wert entspricht nach Gleichung 3), welche

$$y = 1$$
$$\text{für } x = 8{,}8 \text{ Liter}$$

ergibt, einem Feuchtigkeitsgehalt von 8,8 Liter.

Die von der Reichsanstalt bei deren amtlichen Prüfungen als Hefnerkerze (HK) bezeichnete Lichteinheit ist somit — genau genommen — die Lichtstärke der Hefnerlampe bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 8,8 Liter auf 1 cbm trockene, kohlensäurefreie Luft.

Aus den Messungen und Versuchsbedingungen folgt ferner (vgl. S. 121), wie der Vollständigkeit halber schon hier bemerkt werden soll:

Die eben definierte Lichtstärke bezieht sich auf einen Barometerstand von 760 mm und auf sog. reine Luft, d. h. auf einen Kohlensäuregehalt von 0,75 Liter auf 1 cbm trockene, kohlensäurefreie Luft.

Berechnung der Lichtstärke y.

α) Man bestimmt zunächst die Dunstspannung e mittels Gleichung 2), berechnet sodann die Feuchtigkeit x [1]) mittels Gleichung 1 a) und setzt diesen Wert in Gleichung 3) ein oder sucht in der Tabelle IV (Anhang), die nach Gleichung 3) berechnet ist, den zu x gehörigen Wert y auf.

β) Man bestimmt zunächst e und setzt diesen Wert gleich in

$$y = 1{,}049 - \frac{5{,}5\,e}{b - e} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

ein, welche Gleichung erhalten wird, wenn man den Wert für x aus Gleichung 1 a) in Gleichung 3) substituiert.

Beispiel: Es sei $t = 19{,}0^0$; $t' = 9{,}1^0$; $b = 761$ mm. Alsdann ist

nach Tabelle III . . $e' = 8{,}64$ mm

nach Gleichung 2) . $e = 8{,}64 - \frac{1}{2}(19{,}0 - 9{,}1)\cdot\frac{761}{755} = 3{,}65$ mm

nach Gleichung 1 a) . $x = \frac{3650}{761 - 3{,}7} = 4{,}82$ oder rund 4,8 Liter [2])

nach Gleichung 3) . $y = 1{,}049 - 0{,}0055\cdot 4{,}8 = 1{,}023$ HK

---

[1]) Wer häufig solche Messungen auszuführen hat, tut gut, sich für die Bestimmung von x Tabellen zu entwerfen.

[2]) Es genügt vollkommen, x auf Zehntel Liter abzurunden, da sich y nur um 0,0003 HK ändert, wenn sich x um 0,05 Liter ändert.

nach Gleichung 4) . $y = 1{,}049 - \frac{5{,}5 \cdot 3{,}65}{761 - 3{,}7} = 1{,}022$ HK

nach Tabelle IV . . $y = 1{,}022$ HK.

Annäherungsformel für y. Mit einer für die Zwecke der Praxis ausreichenden Genauigkeit kann man y auch mittels der Relation

$$y = 1{,}050 - 0{,}0075\, e \quad \ldots \ldots \quad 5)$$

berechnen. In dem oben angegebenen Beispiel wird $y = 1{,}022$ HK.

b) Einfluß der Kohlensäure.

Aus einer Kohlensäurebombe wurde eine größere Menge Kohlensäure in das vorher gut gelüftete Photometerzimmer geleitet, so daß der Kohlensäuregehalt x' von etwa 0,6 bis 13,7 Liter auf 1 cbm trockene, kohlensäurefreie Luft stieg. Innerhalb dieser Grenzen entspricht einer Änderung $\Delta x'$ des Kohlensäuregehaltes eine Änderung der Lichtstärke um den Betrag

$$\Delta y = -0{,}0072\, \Delta x' \quad \ldots \ldots \quad 6)$$

Nimmt also der Kohlensäuregehalt um je 1 Liter zu, so nimmt die Lichtstärke um je 0,0072 HK, d. h. um je 0,7 Proz. ab.

Eine Verunreinigung der Luft durch Kohlensäure vermindert also die Lichtstärke erheblich. Allein in einem gut gelüfteten und hinreichend großen Photometerzimmer schwankt x' nur zwischen 0,6 und 0,9 Liter und ergibt sich im Mittel zu 0,75 Liter; demnach beträgt die Schwankung von x' nur 0,3 Liter. Diese Schwankung übt aber einen schädlichen Einfluß nicht aus, weil die entsprechende Änderung der Lichtstärke nur 0,2 Proz. beträgt.

c) Verminderung des Sauerstoffgehaltes der Verbrennungsluft.

Eine solche Verminderung beeinträchtigt die Lichtstärke beträchtlich; ein Mindergehalt an Sauerstoff von 1 Liter in 1 cbm Luft würde, wie eine einfache Rechnung zeigt, die Lichtstärke schon um 2 Proz. verringern.

Als erste Grundbedingung für das Photometrieren mit der Hefnerlampe ist deshalb die Forderung hinreichend großer, gut ventilierter Räume aufzustellen, um so mehr, als eine Sauerstoffentziehung der Luft durch Atmungs- und Verbrennungsprozesse mit einer Vermehrung des Wasserdampf- und Kohlensäuregehaltes verbunden ist. Sehr kleine Räume, insbesondere alle ringsum geschlossenen photometrischen Apparate, geben zu erheblichen Fehlern Anlaß.

Die Abnahme der Lichtstärke durch Verringerung des Sauerstoffgehaltes sowie durch Vermehrung des Wasserdampf- und Kohlensäuregehaltes der Luft ist eine Folge der hierdurch veranlaßten Erniedrigung der Flammentemperatur.

d) Luftdruck.

Durch Auswertung der Beobachtungen nach der Methode der kleinsten Quadrate ergab sich, unter der wohl zutreffenden Voraussetzung, daß genügend Beobachtungsmaterial vorliegt:

α) Gleichung 3) bezieht sich auf einen Luftdruck von 760 mm.

β) Innerhalb der beobachteten Luftdruckschwankungen von 735 bis 775 mm entspricht einer Änderung des Luftdruckes b um $\varDelta b$ eine Änderung der Lichtstärke um

$$\varDelta y = 0{,}00011\, \varDelta b \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

Einer Luftdruckschwankung um 40 mm entspricht also eine Änderung der Lichtstärke um nur 0,4 Proz.

Ferner ergaben direkte Messungen in einer ärztlichen pneumatischen Kammer, in welcher sich der Luftdruck in gewissen Grenzen unter gleichzeitiger Zufuhr von frischer Luft ändern läßt, bei einer

Verringerung des Luftdruckes um	50	100	150	200	250 mm
eine Schwächung der Lichtstärke um	0,8	2,6	5,3	9,4	14,8 Proz.,

während ein Überdruck bis zu 150 mm keine Änderung der Lichtstärke erkennen ließ. Doch sind diese Messungen nicht ganz einwandfrei, weil die Hefnerlampe besonders während des Überdruckes unruhig brannte und weil ein Webersches Photometer, das mit einer Benzinkerze (vgl. § 87, f) versehen war, zur Verwendung gelangte.

e) Die vollständige Formel für die Lichtstärke

unter Berücksichtigung von Feuchtigkeit, Kohlensäuregehalt und Luftdruck ist also

$$y = 1{,}049 - 0{,}0055\, x - 0{,}0072\, (x' - 0{,}75) + 0{,}00011\, (b - 760) \quad 8)$$

Wie S. 119 vorausgreifend bemerkt wurde, wird

$$y = 1 \text{ HK für } x = 8{,}8 \text{ Liter}; \quad x' = 0{,}75 \text{ Liter}; \quad b = 760 \text{ mm}.$$

§ 51. Mittel zur Beseitigung des Zuckens.

Die Messungen mit der Hefnerlampe werden zuweilen durch ein lebhaftes Zucken der Flammenspitze sehr erschwert. Dieser Übelstand rührt in vielen Fällen daher, daß der Docht zu fest in das Dochtrohr eingepreßt ist. Dieser letztere Fehler kann also leicht erkannt und vermieden werden.

Bei Benutzung von reinem Amylacetat läßt sich nach Versuchen der Reichsanstalt das Zucken stets beseitigen

1. durch Anwendung von mindestens 0,25 mm starken Dochtrohren von normaler Länge;

2. durch normalwandige Dochtrohre von höchstens 10 mm freistehender, also 20 mm ganzer Länge;

3. dadurch, daß man über ein normalwandiges Dochtrohr von normaler Länge ein zum besseren Federn aufgeschlitztes Messingrohr (Schiebhülse) von mindestens 15 mm Länge so aufschiebt, daß es ganz oder nahezu auf der Oberkante des Dochtführungsrohres aufsteht.

In allen drei Fällen tritt eine Verringerung der Lichtstärke ein. Fall 1 ist schon auf S. 115 behandelt. In den Fällen 2 und 3 beträgt für die angegebenen Grenzen die Lichtabnahme 3,7 bzw. 1,6 Proz. und die Länge des herausragenden Dochtes mindestens 0,6 mm.

Da die Abmessungen des Dochtrohres für die Beglaubigung vorgeschrieben sind, so können für die Zwecke der Praxis natürlich nur Schiebhülsen in Betracht kommen, welche man der Bequemlichkeit wegen mit einem zum Rohr rechtwinkeligen Griffe versehen wird.

IV. Pentanlampen.

§ 52. Kurzer Überblick über die Pentanlampen.

Vernon Harcourt hat seit 1877 im ganzen fünf Pentanlampen konstruiert, von denen drei 1-Kerzen- und zwei 10-Kerzenlampen sind. Von diesen sind nur die drei in den folgenden Paragraphen näher beschriebenen weiter bekannt geworden. Die erstere derselben ist eine Modifikation der Giroudlampe und wird statt mit Leuchtgas mit Pentanluftgas gespeist. Die zweite ist eine einen Docht benutzende und mit flüssigem Pentan gespeiste Modifikation der Methvenlampe. Die dritte 1898 beschriebene Lampe, welche eine besondere Ausführungsform eines schon früher von Dibdin[1]) gemachten Vorschlages ist, benutzt das Methvenprinzip und wird mit Pentanluftgas gespeist; sie ist also gewissermaßen eine Kombination der beiden anderen Lampen.

Fig. 32.



§ 53. Dochtlose 1-Kerzen-Pentanluftgaslampe[2]).

Die Lampe ist ein Einlochbrenner (Fig. 32), bestehend aus einem 4″ engl. (102 mm) langen und 1″ (25,4 mm) weiten Messingrohre *R*, dessen obere $^1/_2$″ (12,7 mm) dicke Abschlußscheibe mit einer $^1/_4$″ (6,3 mm) weiten Öffnung *a* versehen ist. Unterhalb der Flamme ist der Brenner von einem Zylinder *c* umgeben, welcher einen starken, aufsteigenden Luftstrom erzeugt und dadurch der Flamme eine hinreichende Steifigkeit gibt. Die Lampe wird mit einer Mischung von 7 Volumenteilen Pentangas und 20 Volumenteilen Luft gespeist und besitzt bei einer Flammenhöhe von 2,5″ (63,5 mm) eine Lichtstärke von 1 engl. Kerze. Die Flammenhöhe wird mittels

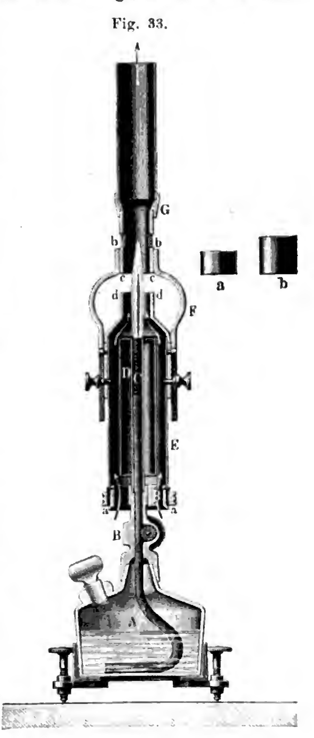
[1]) J. of Gas Lighting 65, 1021 (1895); Z. f. Bel. 1, 247 (1895).

[2]) Rep. Brit. Assoc. Plymouth 1877 (2), S. 51; Chem. News 36, 103 (1877).

des Flammenmessers *M* unter Benutzung eines Mikrometerhahnes eingestellt. Der stündliche Verbrauch beträgt dann etwa 0,5 Kubikfuß (14,2 Liter).

Die Gasmischung wird in der Weise hergestellt, daß man in einen Gasbehälter 3 Kubikfuß (85 Liter) Luft zieht und sodann mittels einer Pipette 9 Kubikzoll (0,15 Liter) Pentan hinzufügt, welches nach seiner Verdunstung einen Raum von 1,05 Kubikfuß (29,8 Liter) einnimmt. Da der Gasbehälter wegen seiner Größe feststehen muß, ist diese Lampe nicht tragbar. Allerdings hat Harcourt[1]) auch eine tragbare Lampe konstruiert, indem er in sie einen kleinen Gaserzeugungsapparat einbaute, mittels dessen sich Pentandämpfe erst während des Verbrauches durch Verdunsten entwickeln und mit der Luft selbsttätig in richtigem Verhältnis mischen sollten. Die letztere Anordnung hat sich jedoch nicht bewährt.

Fig. 33.



§ 54. 1-Kerzen-Pentandochtlampe[2]).

a) Beschreibung und Funktionieren der Lampe.

Fig. 33 zeigt die Lampe, wie sie von Woodhouse und Rawson in London hergestellt wird. Sie besteht aus dem Gefäß *A*, dem Dochtführungsrohre *B* und dem Dochtrohre *C*. Das letztere ist zum Schutze gegen Wärmeverlust von dem Mantel *D* umgeben und wird infolgedessen durch die Flamme ziemlich stark erhitzt. Das Rohr *E*, das mittels Bajonettverschlusses bei *a* auf *B* befestigt wird, umgibt den Mantel *D* und ist durch zwei am unteren Ende mit Schlitzen versehenen Stangen *F* mit dem darüber angebrachten Schornstein *G* fest verbunden.

[1]) Rep. Brit. Ass. Southport 1883, S. 426.

[2]) Rep. Brit. Ass. Manchester 1887, S. 617; J. f. G. u. W. 31, 1133 (1888).

Der letztere besitzt unten bei *bb* zwei einander gegenüberliegende 10 mm hohe Öffnungen zur Einstellung der Flammenspitze.

Die Rohre *E* und *G* erzeugen einen starken Luftzug und blenden, wie bei der Methvenlampe, den oberen und unteren Teil der Flamme ab. Durch zwei der Lampe beigegebene Lehren (Fig. 33 a und b) wird der Abstand zwischen *E* und *G* so reguliert, daß sich eine Lichtstärke von 1 oder 1,5 bzw. 2 englischen Kerzen ergibt.

Das flüssige Pentan wird mittels eines Dochtes aus dem Behälter *A* zum Dochtrohre *C* emporgeführt und dort durch die verhältnismäßig hohe Temperatur von *C* vergast. Die Flamme selbst entwickelt sich erst am oberen Rande von *C*, etwa 5 cm oberhalb des Dochtes. Der Docht kommt also mit der Flamme nicht in Berührung; er verkohlt deshalb nicht und übt keinen Einfluß auf die Lichtstärke aus. Die Vergasung des Pentans wird durch eine Hilfsflamme eingeleitet, welche nachher wieder entfernt wird.

Während der ersten 30 Minuten nach dem Anzünden[1]) nimmt die Flammenhöhe allmählich zu, so daß der Docht fortwährend heruntergeschraubt werden muß. Während dieser Zeit wächst selbst bei richtiger Flammenhöhe die Lichtstärke fortwährend. Erst nach etwa einer halben Stunde ändert sich die Flammenhöhe nur noch langsam, und es erreicht die Lichtstärke einen konstanten Wert, der um mehrere Prozent höher als der Anfangswert liegt. Allein auch nach Eintritt dieses Zustandes darf man die Lampe nur kurze Zeit ohne Aufsicht lassen, weil sie sich sonst überhitzen oder wegen allmählicher Abkühlung ausgehen könnte.

b) Lichtstärke der Lampe.

Hierüber hat Liebenthal[1]) folgende Versuche angestellt:

α) Einfluß der Flammenhöhe. Nach Harcourt sollten Schwankungen der Flammenhöhe bis zu 38 mm ohne Einfluß auf die Lichtstärke der ausgeblendeten Flamme sein. Dies ist jedoch nicht der Fall. Die Lichtstärke erreicht ein Maximum, wenn sich die Flammenspitze in der Mitte der Öffnungen *bb* befindet; sie ist um 2,1 bzw. 2,5 Proz. kleiner, wenn sie an den unteren bzw. oberen Rand von *bb* anspielt. Noch größere Schwankungen der Flammenhöhe haben Änderungen im Gefolge, welche selbst für technische Zwecke nicht zu vernachlässigen sind; denn es ist die Lichtstärke um 8 Proz. kleiner als die maximale, wenn die Flammenspitze relativ wenig, etwa 7 mm, über den oberen Rand von *bb* in den Schornstein ragt, und eine weitere Abnahme von mindestens 7 Proz. wurde festgestellt, als die Flamme noch größer wurde. Mithin erfordert die Pentanlampe ebenso wie die Hefnerlampe für genaue Messungen die Einstellung auf eine *bestimmte Flammenhöhe*, und zwar empfiehlt es sich aus den angegebenen

---

[1]) Z. f. Instrk. **15**, 167 (1895).

Gründen, die Flamme auf die Mitte der Öffnungen einzustellen und die dieser Flammenhöhe entsprechende Lichtstärke als die normale anzusehen.

β) Einfluß der halbseitigen Abblendung. Bei der Methvenlampe ist die auf dem Photometerschirme erzeugte Beleuchtung E dem Quadrate der Entfernung von der Ebene der Blende bis zum Photometerschirme umgekehrt proportional (S. 94). Dagegen ist bei der Pentanlampe infolge der nur halbseitigen Abblendung der Flamme (von oben und unten, dagegen nicht von links und rechts) die Beleuchtung E dem Quadrate der Entfernung vom Photometerschirme bis zu derjenigen senkrechten Achse umgekehrt proportional, welche, vom Photometer aus gesehen, um den halben Radius ϱ der Enden cc und dd der abblendenden Rohre E und G vor der Flammenachse liegt.

Beweis. Bezeichnet man die Lichtstärke des von den Ebenen cc und dd herausgeschnittenen Flammenstückes mit J, die Entfernung vom Photometerschirme bis zur Flammenachse mit r, so ist, überall gleiche Helle des freien Flammenteiles vorausgesetzt,

$$E = \frac{J \cdot \frac{r}{r - \varrho}}{r^2} = \frac{J}{r(r - \varrho)},$$

wofür wir, da ϱ gegen r immer hinreichend klein ist, setzen dürfen

$$E = \frac{J}{\left(r - \frac{\varrho}{2}\right)^2}.$$

Mithin verhält sich die ausgeblendete Pentanflamme wie eine frei brennende Flamme, welche die Lichtstärke J besitzt und sich in der Entfernung

$$r' = r - \frac{\varrho}{2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

vom Photometerschirm befindet. Legt man bei der Berechnung stets diese Entfernung r' zugrunde, so erhält man also ohne jede Umrechnung die Lichtstärke des von den beiden Begrenzungsebenen cc und dd herausgeschnittenen Flammenstückes.

γ) Einfluß der Feuchtigkeit. Zwischen der Lichtstärke y in HK und dem Feuchtigkeitsgehalte x besteht die von 4 bis 18 Liter und für einen Barometerstand von 760 mm geltende Formel:

$$y = 1{,}232 - 0{,}0068\,x = 1{,}232\,(1 - 0{,}0055\,x) \quad . \quad . \quad 2)$$

wenn die Flammenhöhe so reguliert wird, daß sich die Spitze in der Mitte der Öffnungen bb befindet, wenn also die maximale Lichtstärke gemessen wird.

Ein graphisches Bild dieser Abhängigkeit gibt Fig. 34 a. f. S.

Die nach Gleichung 2) berechneten Lichtstärken weichen von den beobachteten bis zu 1,6 Proz., im Mittel um $\pm$ 0,81 Proz. ab.

Aus der letzteren Gleichung und Gleichung 3), S. 118, ergibt sich beim Feuchtigkeitsgehalte x das Verhältnis

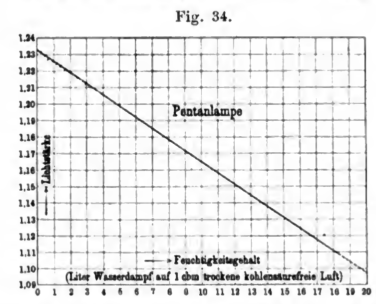
$$\frac{\text{Lichtst. der Pentanlampe}}{\text{Lichtst. der Hefnerlampe}} = 1{,}175 \cdot (1 - 0{,}0002\, x) \quad . \quad . \quad 3)$$

Aus dieser Gleichung folgt:

1. Da der Koeffizient von x sehr klein ist, so werden Pentanlampe und Hefnerlampe gleich stark von der Feuchtigkeit beeinflußt.

2. Die vom Verfasser untersuchte 1-Kerzen-Pentandochtlampe hatte eine Lichtstärke von 1,175 HK, also etwa 2,6 Proz. mehr, als die englische Kerze, wenn man nach dem Vorgange der Reichsanstalt für das Verhältnis der Lichtstärken der englischen Kerze und der Hefnerlampe die Zahl 1,14 (§ 67) zugrunde legt.

Fig. 34.



δ) Einfluß des Luftdruckes. Für Schwankungen des Luftdruckes b zwischen 735 und 775 mm entspricht einer Änderung des Luftdruckes um Δb eine Änderung der Lichtstärke in HK um

$$\Delta y = 0{,}00049 \cdot \Delta b \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Mithin würde einer Änderung des Luftdruckes um 40 mm eine Änderung der Lichtstärke um 1,7 Proz. entsprechen. Der Einfluß des Luftdruckes ist also für diese Pentanlampe größer als für die Hefnerlampe.

Untersuchungen über den Einfluß der Abmessungen und des Leuchtmaterials sind hier vom Verfasser nicht ausgeführt worden, da es ihm nur darauf ankam, festzustellen, ob die Pentandochtlampe in ebenso starkem Maße wie die Hefnerlampe von der Feuchtigkeit beeinflußt wird.

§ 55. Dochtlose 10 Kerzen-Pentanluftgaslampe [1]).

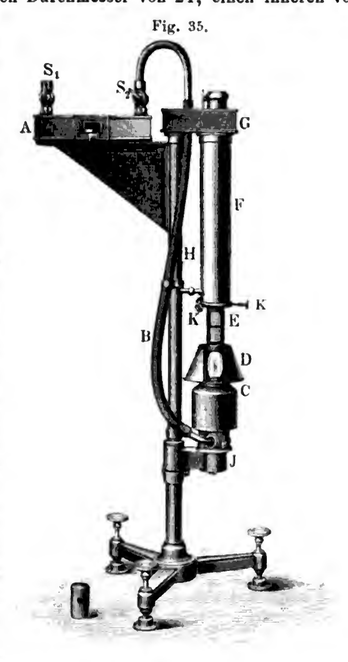
a) Beschreibung und Funktionieren der Lampe.

Die Lampe (Fig. 35) besteht aus dem Flüssigkeitsbehälter A, dem Verbindungsschlauch B und dem Suggschen Argandbrenner C. Auf C steht der konische, an der dem Photometer zuzuwendenden Seite mit einem Ausschnitt versehene Metallschirm D. Über dem Brenner

[1]) Rep. Brit. Assoc. Bristol 1898, S. 845; J. f. G. u. W. **41**, 653 (1898).

befindet sich der unten mit einem Glimmerfenster versehene Schornstein *E*, dessen unterer Rand in kaltem Zustande 47 mm über dem Specksteinring des Brenners *C* liegen soll. Diese Entfernung wird mittels der in der Figur links unten sichtbaren Lehre von Buchsbaumholz eingestellt. *E* ist von einem weiteren Mantel *F* umgeben. Der Argandbrenner *C* hat einen äußeren Durchmesser von 24, einen inneren von 14 mm; er ist mit 30 Löchern versehen, deren Durchmesser nicht weniger als 1,25 und nicht mehr als 1,5 mm betragen soll. Das Fenster ist etwa 42 mm hoch und trägt ungefähr in der Mitte eine horizontale Marke.

Fig. 35.



Das Gefäß *A* wird zu Anfang bis zu zwei Drittel mit Pentan gefüllt, welches so zeitig nachzufüllen ist, daß der durch seitliche Fenster zu beobachtende Flüssigkeitsstand nicht weniger als 3 mm beträgt. Durch den Hahn S_1 tritt die äußere Luft ein und sättigt sich, indem sie durch eine Reihe von Kammern hindurchgeht, mit Pentandampf. Das Gemisch passiert den Hahn S_2, fällt durch den Verbindungsschlauch vermöge seines großen spezifischen Gewichtes herab und gelangt dann in den Brenner *C*. Mittels der beiden Hähne oder auf andere geeignete Weise soll die Flamme so einreguliert werden, daß sich ihre Spitze ungefähr in der Mitte zwischen dem unteren Rande und der horizontalen Marke des Fensters befindet.

Der Mantel *D* und der Schornstein *E* geben der Flamme durch den kräftigen Luftzug, welchen sie erzeugen, genügende Steifigkeit; außerdem blendet *E* den oberen Teil der Flamme ab. Die zwischen den beiden Rohren *E* und *F* einsdringende und sich hierbei erwärmende Luft durchströmt die Hohlräume des Verbindungskastens *G*, der Säule *H*

und des horizontalen Brennerträgers J und gelangt sodann in das Innere der Flamme. Die innere Verbrennungsluft ist also vorgewärmt, so daß die Lampe eine Art Regenerativbrenner bildet. Die drei Stellschrauben am Fuße dienen zum Vertikalstellen der Säule H. Mittels dreier Stellschrauben K am Ende von F wird E zentrisch über C gestellt. Zum Schutze gegen Verstaubung ist nach dem Gebrauche eine Kappe über C zu setzen. Ebenso sind dann S_1 und S_2 zu schließen.

Die Lampe ist so aufzustellen, daß die Verlängerung der unteren Ebene des Schornsteines E durch die Mitte des Photometerschirmes (§ 78) geht. Aus der Entfernung r zwischen Schirm und Flammenachse findet man dann unmittelbar, d. h. ohne jede Korrektion, die Lichtstärke des unterhalb E liegenden Flammenteils.

Die Lampe erreicht nach etwa 10 Minuten einen nahezu stationären Zustand und bedarf dann im Gegensatz zur Pentandochtlampe nicht mehr einer steten Beaufsichtigung. Die Lichtstärke nimmt zu Anfang schnell zu und erreicht ebenfalls nach etwa 10 Minuten einen nahezu konstanten Wert.

b) Einfluß der Flammenhöhe.

Nach Harcourt soll eine Vergrößerung oder Verkleinerung der vorgeschriebenen Flammenhöhe um 6 mm ohne Einfluß auf die Lichtstärke sein. Nach den Untersuchungen der Reichsanstalt [1]) gilt dies nahezu, wenn die Flamme größer als die vorgeschriebene ist dagegen nicht, wenn sie kleiner ist. Wenn die Flammenspitze an den unteren Rand des Beobachtungsfensters anspielt, ist die Lichtstärke um etwa 3 Proz. kleiner als die normale. Also auch bei dieser Lampe muß für genaue Messungen die Flammenhöhe genau einreguliert werden.

c) Einfluß der Feuchtigkeit und des Luftdruckes.

Nach Paterson [2]) besteht zwischen der Lichtstärke y, der Feuchtigkeit x in Litern auf 1 cbm trockene, kohlensäurefreie Luft und dem Barometerstande b die Gleichung

$$y = 10 + 0{,}066\,(10 - x) + 0{,}008\,(b - 760),$$

wenn für $x = 10$ Liter und $b = 760$ mm $y = 10$ gesetzt wird.

Eine Änderung der Feuchtigkeit um 1 Liter bringt also eine Änderung der Lichtstärke um 0,66 Proz. hervor; eine Änderung des Barometerstandes um 10 mm verändert die Lichtstärke um 0,8 Proz. Die Reichsanstalt [1]) fand statt 0,66 und 0,8 die Werte 0,55 und 0,6 Proz. Die Übereinstimmung ist also eine gute.

Die Lampe wird demnach durch die Feuchtigkeit ebenso

[1]) J. f. G. u. W. 49, 559 (1906).
[2]) Electrician (2) 53, 751 (1904).

stark, durch den Barometerstand aber weit stärker beinflußt als die Hefnerlampe und die 1-Kerzen-Pentandochtlampe.

Die 10-Kerzen-Pentanlampe besitzt gegenüber der letzteren Lampe wesentliche Vorzüge.

§ 56. Der Brennstoff der 10-Kerzen-Pentanluftgaslampe.

a) Herstellung und Prüfung des Pentans in England.

Das Pentan, C_5H_{12}, ist eine wasserhelle, flüchtige und leicht entzündliche Flüssigkeit.

Das früher in England käufliche Pentan war nicht genügend rein. Deshalb wird dort jetzt für photometrische Zwecke nur solches Pentan verwendet, welches nach den unten stehenden Anweisungen der Gas Referees[1]) zu London *hergestellt* ist und den darin angegebenen *Prüfungsvorschriften* genügt.

α) Herstellung. Leichtes amerikanisches Petroleum, wie Gasolin, wird durch drei aufeinanderfolgende Destillationen bei 55, 50 und 45° C weiter gereinigt. Sodann werden 10 Volumteile des Destillats von 45° zunächst mindestens 3 Stunden lang mit 1 Volumteil konzentrierter Schwefelsäure, dann ebensolange mit 1 Volumteil Ätznatronlösung von Zeit zu Zeit stark durchgeschüttelt. Danach wird es wieder destilliert, und zwar wird für den Gebrauch nur der zwischen 25 und 40° überdestillierende Teil aufgefangen. Derselbe besteht hauptsächlich aus Pentan, mit geringen Beimengungen von niedrigeren und höheren Homologen, welche die Lichtstärke der Lampe nicht beeinflussen.

β) Prüfung. Das auf Wasser von 4° C bezogene spezifische Gewicht des flüssigen Pentans bei 15° C soll nicht weniger als 0,6235 und nicht mehr als 0,626 betragen. Die Dampfdichte des Pentans, bezogen auf die des Wasserstoffs bei gleicher Temperatur und Spannung, soll zwischen 36 und 38 liegen. Für die Prüfung auf Dampfdichte wird die Methode von Gay-Lussac bei einem Druck von etwa einer halben Atmosphäre und bei Temperaturen zwischen 25 und 35° empfohlen.

Das Pentan darf keine Kohlenwasserstoffe enthalten, die zu anderen Gruppen gehören und stärker als Pentan leuchten, wie Benzol und Amylen. Solche Beimischungen lassen sich durch folgende Prüfung nachweisen. Man gießt in eine zustöpselbare, etwa 114 ccm fassende Flasche von weißem Glase 10 ccm Salpetersäure vom spez. Gew. 1,32 (hergestellt durch Verdünnen reiner Salpetersäure mit dem halben Volumen Wasser) und fügt 1 ccm einer verdünnten Lösung von übermangansaurem Kali hinzu, welche 0,1 g übermangansaures Kali in 200 ccm enthält. Dann gießt man 50 ccm des zu prüfenden Pentans in die Flasche und schüttelt das Ganze fünfmal je 20 Sekunden lang stark durch. Sind nur Paraffine vorhanden, so bleibt die rote Farbe, wenn auch etwas schwächer, bestehen, während die Flüssigkeit bei Anwesenheit von nur ½ Proz. Amylen oder Benzol entfärbt wird.

b) Einfluß des Pentans.

In der Reichsanstalt (Anm. 1, S. 128) wurden Versuche ausgeführt

1. mit englischem, d. h. in England hergestelltem Pentan, welches von der Firma Carless, Capel u. Leonhard in London bezogen war,

---

[1]) Notification of the Gas Referees for the year 1901.

2. mit drei Sendungen von Pentan, welches von der Firma C. A. F. Kahlbaum in Berlin zu verschiedenen Zeiten nach den Vorschriften der Gas Referees hergestellt war,

3. mit sogenanntem „Pentan Kahlbaum“, einem nach Angabe der Firma einheitlichen chemischen Körper von der Formel

$$\begin{matrix} CH_3 \\ CH_3 \end{matrix}\!\!>CH-CH_2-CH_3,$$

4. mit „käuflichem Pentan“ derselben Firma.

Prüfungen, welche vom chemischen Laboratorium der Reichsanstalt mit den Sorten 1 und 2 ausgeführt wurden, ergaben, daß die drei Sendungen 2 den englischen Prüfungsvorschriften genügten, daß ihnen dagegen das englische Pentan nicht streng genügte, weil das spezifische Gewicht 0,6275 betrug, also etwas zu groß war. Diese Abweichung des spezifischen Gewichtes hatte offenbar darin ihren Grund, daß ein Teil der Flüssigkeit während des Transportes in einem nicht tadellos schließenden Gefäß durch fraktioniertes Verdunsten verloren gegangen war.

Die Pentansorten 1 und 2 ergaben in zwei 10-Kerzen-Pentanlampen von vorgeschriebenen Abmessungen (vgl. S. 143) die gleiche Lichtstärke, die Sorte 3 eine um 1 Proz. kleinere Lichtstärke. Dagegen lieferte käufliches Pentan einen um 20 Proz. kleineren Wert. Das letztere Ergebnis zeigt, daß man in der Wahl des Brennstoffes vorsichtig sein muß.

V. Neuere Vorschläge.

§ 57. Lampen mit flüssigem Brennstoff.

a) Die Äther-Benzollampe wird von der holländischen Lichtmeßkommission[1]) vorgeschlagen. Sie ist eine nur unwesentliche Abänderung der Pentandochtlampe, in welcher statt Pentan eine Mischung von 9 Teilen Benzol in 100 Teilen Äthyläther als Brennstoff benutzt wird. Von der Anwendung von Pentan wurde abgesehen, weil dieser Brennstoff, welcher damals in England nur aus einer einzigen Bezugsquelle zu erhalten war, nicht mit dem wirklichen C_5H_{12} übereinstimmte. Die Lichtstärke soll 1,48 englische Kerzen betragen.

b) Broca[2]) empfiehlt eine Naphtalinlampe mit einer Schmetterlingsflamme, die gerade vor dem Rußen steht. Da die Lichtstärke stark von der Temperatur abhängt, ist die Lampe in eine Hülle von konstanter Temperatur zu setzen.

---

[1]) Rapport der Niederländischen Photometriekommission 1893; Referat von Krüss, J. f. G. u. W. 37, 613 (1894).

[2]) L'Écl. électr. 8, 54 (1896).

c) Blondel[1]) empfiehlt als ein der Hefnerkerze gleiches Lichtmaß die Lichtstärke einer Schornsteinlampe, in welcher eine Mischung von 84 Proz. abs. Alkohol und 16 Proz. Benzol verbrennt. Ein metallener Schornstein, welcher die ganze Flamme umgibt und ihr eine hinreichende Steifigkeit verleihen soll, ist innen geschwärzt und in der ganzen Ausdehnung der Flamme durch zwei gegenüberliegende Glasplatten geschlossen, welche zur Vermeidung von wiederholten Reflexen schräg gestellt werden. Gegen die Anwendung des Amylacetats hat Blondel nur einzuwenden, daß es in Frankreich nicht genügend rein zu beziehen ist und einen unangenehmen Geruch besitzt.

d) v. Hefner-Alteneck[2]) hat Versuche darüber angestellt, ob die Hefnerlampe verbesserungsfähig ist, an der er die geringe Lichtstärke, sowie den Umstand beanstandet, daß das Amylacetat kein chemisch reiner Stoff ist, d. h. meistens Verunreinigungen enthält und daß es unangenehm riecht. Durch ausgedehnte Versuche stellte er fest, daß sich die Lichtstärke durch Änderungen in der Form und Größe des Brenners nicht einmal verdoppeln, also nur unwesentlich erhöhen läßt. Dagegen empfiehlt sich eine Verstärkung des Dochtrohres, weil dann die Flamme ruhiger brennt; außerdem würde es wünschenswert sein, das Neusilber, das eine nicht genügend bestimmte Legierung ist, durch ein einheitliches Metall zu ersetzen (vgl. S. 116). Versuche, das Amylacetat durch einen chemisch reinen Brennstoff oder durch Benzol-Alkoholmischungen (also Gemische von chemisch reinen kohlenstoffreichen und kohlenstoffarmen Flüssigkeiten) zu ersetzen, haben zu keinem abschließenden Ergebnis geführt.

Wenn man einmal an eine Änderung der Lampe gehen sollte, würde es nach Ansicht des Verfassers genügen, die Wandstärke zu erhöhen, etwa auf 0,25 mm, und wegen der dadurch veranlaßten Abnahme der Lichtstärke die Flammenhöhe entsprechend zu vergrößern.

§ 58. Lampen mit gasförmigem Brennstoff.

a) Acetylenlampe. Acetylen entspricht den Forderungen für die Darstellung einer Lichteinheit insofern in hohem Maße, als es ein einfaches Gas von unveränderlicher chemischer Zusammensetzung ist und sich in hinreichender Reinheit gewinnen läßt. Nichtsdestoweniger haben die Versuche mit diesem Gase bisher noch nicht zu einem befriedigenden Ergebnisse geführt; als ein Hauptübelstand wird das Verstopfen des Brenners angegeben. (Vgl. § 150b).

Violle[3]) benutzt bei seiner Acetylenlampe einen Ausschnitt aus einer Schmetterlingsflamme, welche mit einem Acetylenluftgemisch

[1]) L'Écl. électr. **16**, 317 (1898); J. de l'éclair. au gaz, 20. März 1899; Referat von Krüss, J. f. G. u. W. **42**, 389 (1899).

[2]) Berl. Ber. 1902, S. 980; J. f. G. u. W. **46**, 348 (1903).

[3]) C. R. **122**, 79 (1896).

gespeist wird. Bei einem Druck von 300 mm Wasser beträgt der stündliche Gasverbrauch 58 Liter und die Lichtstärke der ganzen Flamme über 100 bougies décimales (S. 133). Die Farbe des Lichtes stimmt nahezu mit der des erstarrenden Platins überein.

Féry [1]) verbrennt Acetylen am Ende einer scharf abgeschnittenen Kapillare (Thermometerrohr) von 0,5 mm Durchmesser. Entsprechend dem Gasdruck schwankt die Flammenhöhe zwischen 5 und 35 mm, der stündliche Verbrauch zwischen 1,15 und 6 Liter. Es wird stets die ganze Flamme benutzt. Die Lichtstärke derselben ist für Flammenhöhen h zwischen 10 und 25 mm eine lineare Funktion von h, so daß man die Lichtstärke bei der benutzten Flammenhöhe berechnen kann, sobald man die Lichtstärke für eine bestimmte Flammenhöhe gemessen hat.

Neuerdings schaltet Féry [2]) zwischen diese Flamme und den Photometerschirm ein System von zwei Linsen derart ein, daß die Flamme mittels der ersteren Linse auf einer zweiten, deren Brennweite doppelt so groß ist, in natürlicher Größe abgebildet wird. Unmittelbar vor der zweiten Linse ist eine Blende angebracht. Die Anwendung von Linsen für vorliegende Zwecke ist nicht einwandfrei.

Auch Fessenden hat eine Acetylenlampe vorgeschlagen.

b) Die Commission of the American Institute of Eletrical Engineers empfiehlt eine Lampe, in welcher eine Mischung von zwei Teilen Acetylen und einem Teile Wasserstoff in einem reinen Sauerstoffstrome verbrennt.

c) Blondel schlägt in seinem an den internationalen Elektrikerkongreß zu Genf 1896 erstatteten Bericht (Anm. 1, S. 147) vor, reines Äthylen in reinem Sauerstoff zu verbrennen.

C. Glühkörper-Einheitslampen.

§ 59. Die Schwendlersche Platin-Einheitslampe.

Auf Grund von Anregungen, die bereits von Draper 1847 und Zöllner [3]) gemacht waren, schlug Schwendler [4]) als Lichteinheit die Lichtstärke eines hufeisenförmigen Platinbleches von vorgeschriebenen Dimensionen vor, welches von einem elektrischen Strome von vorgeschriebener Stromstärke durchflossen wird. Diese Einheit ist sehr ungenau. Ein Hauptübelstand ist, daß der Querschnitt des Platinbleches sich infolge von Zerstäubung allmählich verringert, und daß dadurch die Temperatur und Lichtstärke geändert werden.

---

[1]) C. R. 126, 1192 (1898).
[2]) Bull. Séanc. Soc. Franç. Phys. 1904, S. 64*.
[3]) Pogg. Ann. 100, 381 (1857); 109, 256 (1860).
[4]) Z. f. angew. Elektrizitätslehre 2, 14 (1880).

§ 60. Die Viollesche Platin-Einheitslampe [1]).

(Geschichtliches s. § 69.)

a) Definition [2]).

Als Einheit des weißen Lichtes gilt die Lichtstärke, welche 1 qcm der Oberfläche geschmolzenen Platins im Momente des Erstarrens in senkrechter Richtung besitzt.

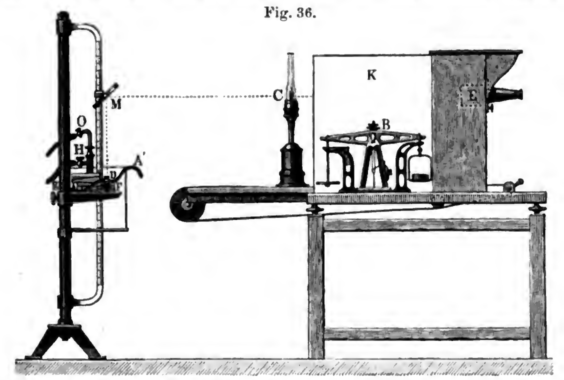
Als Einheit des farbigen Lichtes gilt die Lichtstärke des gleichfarbigen Lichtes, welches in dem weißen Platinlichte enthalten ist.

Der zwanzigste Teil der Violleschen Einheit wird bougie décimale genannt.

b) Darstellung der Einheit durch Violle.

In dem Devilleschen Schmelztiegel *F* (Fig. 36) aus ungelöschtem Kalk wird das Platin mittels eines Sauerstoffleuchtgasgebläses (Gaszulei-

Fig. 36.



tungen *O* und *H*) geschmolzen und bis weit über den Schmelzpunkt (1775° C) erhitzt. Sodann wird die durch die Leitung *A* mit Wasser gekühlte Blende *D* über das Platin gebracht. Das durch *D* vertikal nach oben gehende Licht wird durch den Metallspiegel *M* auf die eine Hälfte des Schirmes eines Foucaultschen Photometers (S. 161) geworfen.

---

[1]) C. R. 88, 171 (1879); 92, 866 (1881); Ann. Chim. Phys. (6) 3, 373 (1884).

[2]) Von der „Internationalen Konferenz zur Bestimmung der elektrischen Einheiten" (S. 146 und 147) war 1884 folgende Definition aufgestellt und angenommen: „Als Einheit ... gilt die Lichtmenge, welche 1 qcm ... in senkrechter Richtung aussendet." Trotz der Zweideutigkeit der redaktionellen Fassung ist jedoch zweifellos, daß man die *Lichtstärke* im Auge hatte.

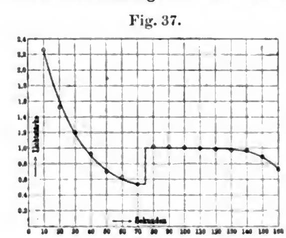
Die andere Hälfte des Schirmes wird durch die verschiebbare Carcellampe *C* beleuchtet. *E* ist die verstellbare Scheidewand des Photometers (*AB* in Fig. 42, S. 161). Die gröbere Trennung des von beiden Lichtquellen kommenden Lichtes geschieht durch den Schirm *K*. *B* ist eine Deleuilsche Wage für die Carcellampe. Benutzt man statt der letzteren eine Glühlampe, so bringt man den Photometerschirm am zweckmäßigsten senkrecht über der Platinwanne an.

Nach Abstellung des Gebläses nimmt die Lichtstärke zunächst sehr stark, dann immer langsamer ab, je mehr sich die Temperatur dem Erstarrungspunkte nähert; sie bleibt nach Violle hierauf konstant, solange die geschmolzene Masse im Erstarren begriffen ist, und nimmt dann nach einer plötzlichen Zunahme abermals rasch ab. Die konstante Lichtstärke wird als Lichteinheit betrachtet.

c) Reproduktionen.

In der physikalisch-technischen Reichsanstalt[1]) wurde von Lummer ohne Erfolg versucht, diese Einheit nach dem Violleschen Schmelzverfahren herzustellen, weil dabei Aufnahme von Gas und Verunreinigungen mit Kohlenwasserstoffen nicht zu vermeiden waren. Auch Schmelzungen im elektrischen Flammenbogen oder mittels eines elektrischen Stromes führten zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Im letzteren Falle, wo statt eines Tiegels aus Kalk ein solcher aus reiner Magnesia benutzt wurde und eine Verunreinigung beim Schmelzen ausgeschlossen war, wichen die Lichtstärken für Platin von verschiedenen Sendungen bis zu 14 Proz. voneinander ab. Chemisch reines Platin ergab dabei im Mittel eine Lichtstärke von 26 HK, während Violle dieselbe zu 19,5 HK (S. 140) gefunden hatte. Bei allen diesen Versuchen wurde ein plötzlicher Sprung der Lichtstärke nicht bemerkt.

Fig. 37.



Petavel[2]) gelangte zu einem günstigeren Ergebnis, als er die Schmelzung mittels eines Knallgasgebläses ausführte. Fig. 37, in welcher die Lichtstärke als Funktion der Zeit aufgetragen ist, zeigt den normalen Verlauf eines solchen Versuches. Etwa 10 Sekunden nach Abstellen des Gebläses, wobei das Platin nur wenig über den Schmelzpunkt erhitzt war, betrug die Lichtstärke in einer gewissen Einheit 2,25; sie nahm dann schnell ab. Nach etwa 75 Sekunden, als das Platin zu erstarren begann, nahm die Lichtstärke plötzlich von etwa 0,55 bis 1,0 wieder zu und nahm dann etwa 45 Sekunden lang

[1]) Tätigkeitsberichte, Z. f. Instrk. 11, 161 (1891); 14, 267 (1894).

[2]) Proc. Roy. Soc. 65, 469 (1899); Electrician (2) 44, 710 (1899/1900).

sehr langsam wieder ab. Nach etwa 140 Sekunden erfolgte schließlich eine sehr schnelle Abnahme der Lichtstärke. Die Lichtstärke unmittelbar nach dem Sprunge wurde als Lichteinheit angesehen. Wiederholte Messungen ergaben Werte, welche höchstens 1 Proz. voneinander abwichen.

Zum Gelingen des Versuches sind folgende Bedingungen erforderlich:

1. das Platin muß chemisch rein sein;
2. der Schmelztiegel muß aus reinem, von Silikaten freiem Kalk bestehen;
3. der Wasserstoff muß frei von Kohlenwasserstoffen sein;
4. auf 4 Vol. Wasserstoff müssen 3 Vol. Sauerstoff kommen.

Innerhalb großer Grenzen soll die Lichtstärke von der Gestalt und Menge des Platins sowie von der Gestalt und Größe des Ofendeckels praktisch unabhängig sein. Bei dem Versuche, dessen normalen Lauf Fig. 37 anzeigt, betrug die Menge des Platins 345 g, der Durchmesser der Öffnung im Ofendeckel 1,6 cm; die Gesamtoberfläche des Platins 17 qcm.

Als Petavel statt des reinen Wasserstoffs Leuchtgas verwendete, war die Lichtstärke um 36 Proz. größer. Die letztere Beobachtung könnte allerdings etwas mißtrauisch stimmen.

Auch die elektrische Methode des Schmelzens hat er untersucht; aber er nahm von derselben Abstand, weil ihm mit den zu Gebote stehenden Hilfsmitteln die oben beschriebene Schmelzung besser gelang.

Bedauerlicherweise hat Petavel die Platineinheit nicht mit den anderen gebräuchlichen Einheiten verglichen.

§ 61. Die Siemenssche Platin-Einheitslampe.

Da die Herstellung der Violleschen Einheit sehr kostspielig und umständlich ist, schlug Werner v. Siemens[1]) vor, nicht die Lichtstärke des erstarrenden, sondern des schmelzenden Platins zu messen. Die von ihm konstruierte Lampe besteht aus einem kleinen Metallkasten, dessen Vorderwand mit einer möglichst genau 0,1 qcm großen Öffnung versehen ist. Hinter dieser Öffnung wird ein etwa 0,015 mm dickes und 5 bis 6 mm breites Platinblech durch einen allmählich anwachsenden elektrischen Strom bis zum Schmelzen erhitzt. Die Lichtstärke unmittelbar vor dem Schmelzen, also vor dem Erlöschen der Lampe, gilt als Einheit. Will man die Messung wiederholen, so schiebt man mittels eines kleinen Zangenmechanismus ein neues Stück des auf eine Rolle aufgewickelten Platinbleches anstatt des geschmolzenen vor die Öffnung.

Verfasser[2]) fand beim Vergleich der Siemenslampe und der Hefnerlampe $\pm 2{,}9$ Proz. als mittlere Abweichung des Lichtstärken-

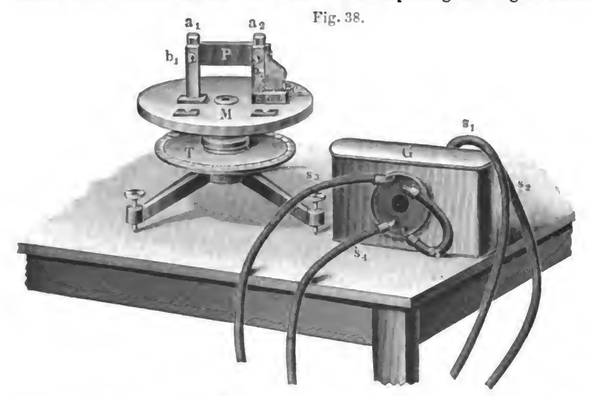
[1]) E. T. Z. 5, 244 (1884).
[2]) Ebenda 9, 445 (1888).

verhältnisses vom Mittelwerte. Er glaubte damals diese beträchtlichen Abweichungen zum größten Teile durch die Unsicherheit der photometrischen Einstellung infolge der größeren Farbendifferenz beider Lampen erklären zu dürfen. Mit verbesserten Hilfsmitteln angestellte Versuche von Lummer und Kurlbaum[1]) ergaben für die Lichtstärke der Platinlampe aber Werte, welche ebenfalls um 10 Proz. und noch mehr voneinander abwichen. Die Schwankungen sind demnach durch die Lampe selbst bedingt. Ein großer Übelstand ist, daß dünne Platinbleche oft zerreißen, lange bevor die ganze strahlende Oberfläche die Schmelztemperatur erreicht hat. Die Lampe hat sich nicht einzubürgern vermocht.

§ 62. Platin-Einheitslampe von Lummer und Kurlbaum[2]).

Ein Platinblech von etwa 25 mm Breite, 60 mm Länge und 0,015 mm Dicke wird hinter einem mit einer Wasserspülung kühl gehaltenen

Fig. 38.



Diaphragma von 1 qcm Öffnung elektrisch geglüht. Die Temperatur wird durch die Bedingung fixiert, daß ein bestimmtes Absorptionsmittel $^1/_{10}$ der Gesamtstrahlung des Platins hindurchläßt. Als Absorptionsmittel dient eine 2 cm dicke Wasserschicht in einem Gefäß mit parallelen Wänden aus Quarzglas von je 1 mm Dicke.

Der zur Herstellung der Lichteinheit benutzte Platinglühapparat (Fig. 38) besteht aus einem Dreifuß, welcher einen Teilkreis T und eine Marmorplatte M trägt. Als Stromzuführungen dienen zwei Messingbalken a_1 und a_2, zwischen denen bei b_1 und b_2 das Platinblech P fest-

[1]) Tätigkeitsbericht der Reichsanstalt, Z. f. Instrk. **13**, 120 (1893).
[2]) Berl. Ber. 1894, S. 229; E. T. Z. **15**, 475 (1894).

geklemmt wird. a_2 ist in horizontaler Richtung durch die Schraube c verstellbar, damit das Platinblech gespannt werden kann. Auf die Marmorplatte, also über das Platinblech, wird während des Versuches zur Vermeidung von unregelmäßigen Luftströmungen eine doppelwandige Metallglocke G (in der Figur neben M stehend gezeichnet) gesetzt; zwischen beiden Wänden zirkuliert zur Abkühlung der Glocke ein Wasserstrom durch die Schläuche s_1 und s_2. Die Vertikalwand der Glocke ist durchbrochen und nimmt die Meßdiaphragmen von 1 bis 4 qcm auf, welche für sich wieder eine innere Wasserspülung durch die Schläuche s_3, s_4 und s_5 besitzen. Zwischen dem Platinblech und dem Bolometer befindet sich ein fallbrettartiger Verschluß, bei dessen Aufziehen das Bolometer bestrahlt wird. Der Verschluß hat eine innere Wasserspülung, welche ihn auf der Bolometertemperatur erhält und welche mit der Wasserspülung des Meßdiaphragmas kommuniziert.

Es darf nur chemisch reines Platin verwendet werden. Bei reinen Blechen wird die Oberfläche vollkommen blank und fast spiegelglatt, während bei den nicht ganz reinen die Verunreinigungen heraus verdampfen, so daß die Oberfläche zwar vollkommen blank, aber nicht vollkommen glatt bleibt. Bei verschiedenen chemisch reinen Blechen blieben die Abweichungen der Lichteinheit immer unterhalb 1 Proz., bei chemisch nicht ganz reinen kamen Abweichungen von 2 bis 3 Proz. vor. Zu den Versuchen wurden mit Platinmohr geschwärzte Bolometer angewandt, welche unter gleichen Bedingungen immer die gleichen Werte der Platineinheit ergaben, während dies mit berußten Bolometern nicht der Fall war. Eine Untersuchung sämtlicher Fehlerquellen ergab, daß sich die Lichteinheit bis auf 1 Proz. genau reproduzieren läßt.

Es sei noch hervorgehoben, daß eine solche Lichteinheit den verschieden gefärbten Lichtquellen sehr einfach durch Vorschrift eines anderen Strahlungsverhältnisses angepaßt werden kann. Versuche, die Temperatur auf andere Weise, z. B. durch das Strahlungsverhältnis zweier beliebigen Wellenlängen, zu definieren, wie es Crova zur Bestimmung des „Glühgrades" vorschlägt, ergaben die von Lummer und Kurlbaum angewandte als die empfindlichste.

§ 63. Vorschlag von Petavel[1]).

Man läßt ein elektrisch geheiztes dünnes Blech aus Platin, Rhodium, Iridium oder aus den Legierungen dieser Metalle zwei Thermosäulen, 1 und 2, bestrahlen. In den Gang des auf 1 fallenden Strahlenbündels schaltet man eine Wasserschicht von bestimmter Dicke, in den Gang des anderen Bündels schwarzen Flußspat von ebenfalls bestimmter Dicke. Bei verhältnismäßig niedriger Temperatur des Bleches wird Säule 2 stärker als 1 bestrahlt. Da mit wachsender Temperatur des

[1]) Electrician (2) 50, 1012 (1902/1903); Rep. Brit. Ass. Belfast 1902, S. 534.

Bleches Wasser für die Strahlen stärker durchlässig, dagegen Flußspat weniger durchlässig wird, so werden bei einer gewissen Temperatur beide Säulen gleich stark bestrahlt. Die letzteren sind gegeneinander geschaltet. Der Heizstrom wird so lange reguliert, bis das Galvanometer keinen Ausschlag gibt. Sind alle Teile in unveränderlicher Stellung zueinander angeordnet, so besitzt das Blech alsdann eine konstante, aber nur mit diesem Apparate wieder herstellbare, also zufällige Temperatur, d. h.: eine bestimmte Temperatur und Lichtstärke ist nach dieser Methode nicht reproduzierbar.

In der Tat beabsichtigt Petavel auch nur eine konstante *Einheitslampe zweiter Klasse*, also gewissermaßen nur eine sich nie ändernde Normallampe (S. 152) herzustellen, welche er nach einer genau reproduzierbaren Lichteinheit (er nennt diese eine Lichteinheit erster Klasse oder, wie es auch häufig geschieht, eine *absolute Lichteinheit*) eichen und zum Eichen der im Gebrauch befindlichen Einheiten (*Verkehrseinheiten*) benutzen will.

Solche Einheitslampen zweiter Klasse sollten dann nach Petavel in den bedeutendsten Laboratorien der ganzen Welt ihren Platz finden. Für die geeignetste absolute Lichteinheit hält er nach seinen Untersuchungen die Viollesche. Das Streben von Petavel ist also im Grunde dahin gerichtet, die Hefnerkerze, welche eine immer größere Verbreitung auch außerhalb Deutschlands findet, wieder durch die Viollesche Einheit zu verdrängen.

Für die Praxis würde eine vollständig konstante Lichtquelle, wie sie Petavel erstrebt, sehr vorteilhaft sein, wofern sie sich hinreichend leicht herstellen läßt. Das letztere ist jedoch bei der Petavelschen Lampe nicht der Fall. Einen ausreichenden Ersatz für eine solche Lampe bietet ein Satz von guten, nur mäßig beanspruchten elektrischen Glühlampen (vgl. S. 153).

§ 64. Die Kraterlicht-Einheitslampe.

Von Abney[1]) wurde 1878 beobachtet, daß die Flächenhelle des Kraters einer Kohle konstant und unabhängig von der zur Erzeugung des Bogens verbrauchten Energie ist. Violle[2]) fand die Flächenhelle für einen Energieverbrauch zwischen 500 und 34 000 Watt ebenfalls konstant; er sieht hierin eine Bestätigung der schon von S. Thompson gemachten Annahme, daß die hellste Stelle des Kraters bis zur Siedetemperatur der Kohle erhitzt wird.

Auf Grund dieser Annahme wurde von Swinburne, Thompson[3]) und Blondel fast gleichzeitig vorgeschlagen, die Lichtstärke von 1 qmm des Kraters, also die Flächenhelle pro Quadratmillimeter, als

---

[1]) Proc. Roy. Soc. **27**, 157 (1878); Phil. Transact. **172**, 887 (1881).

[2]) C. R. **115**, 1273 (1892); J. de Phys. (3) **2**, 545 (1893).

[3]) Phil. Mag. (5) **36**, 120 (1893).

Lichteinheit zu benutzen. Natürlich muß bei den Messungen die negative Kohle so angeordnet werden, daß sie kein Kraterlicht abblendet. Ferner muß vor der positiven Kohle ein Diaphragma aufgestellt werden, welches nur die Strahlen des hellsten Kraterteiles hindurchläßt.

Blondel[1]) fand die oben definierte Flächenhelle im Mittel zu 158 bougies; die extremen Werte betrugen 150 und 163 bougies. Petavel[2]) versuchte drei Anordnungen. Von diesen erwies sich nur die dritte als brauchbar, bei welcher die positive und negative Kohle aufeinander senkrecht standen. Er fand, daß selbst bei einem ruhig brennenden Bogen der Krater sich zur Darstellung der Lichteinheit nicht eignet, da bei Konstanthaltung aller einschlägigen Größen Schwankungen bis zu 10 Proz. vorkommen; im Mittel betrug die Lichtstärke auf das Quadratmillimeter 147 candles. Dagegen haben die Veränderungen des Kohlendurchmessers, der Stromdichte und der Bogenlänge sowie die Temperatur der umgebenden Luft wenig Einfluß auf die Flächenhelle. Nach Violle ist die Ursache der Mißerfolge in der von Trotter[3]) 1894 gemachten Beobachtung zu suchen, daß die hellste Stelle des Kraters periodischen Ortsveränderungen unterworfen ist.

§ 65. Der schwarze Körper zur Darstellung der Lichteinheit.

Ein Übelstand der eben beschriebenen Einheiten ist, daß sich die Oberflächenbeschaffenheit nicht definieren läßt. Dagegen ist durch den schwarzen Körper, worauf wohl zuerst Lummer aufmerksam machte, eine definierte Oberfläche gegeben, so daß für die Lichteinheit außer der Größe der strahlenden Blendenöffnung nur noch eine gut definierte Temperatur gegeben zu sein braucht.

Auch für den vorliegenden Zweck sind die in Fig. 12 und 13 (S. 42) dargestellten schwarzen Körper wegen ihrer leichten Handhabung sehr geeignet. Zum Festhalten einer bestimmten Temperatur empfiehlt sich die in § 62 angegebene Methode. Ein Thermoelement ist zu ungenau, weil für die hier zu wählenden Temperaturen die Lichtstärke sich um 15 bis 19 Proz. ändert, wenn die Änderung der Temperatur 1 Proz. beträgt (S. 95).

Einen Überblick über die hier in Betracht kommenden Lichtstärken geben uns die folgenden Zahlen von Lummer und Pringsheim[4]): es beträgt die Lichtstärke von 1 qmm des schwarzen Körpers

bei 1175° C etwa 0,0042 HK
„ 1325° „ „ 0,0220 „
„ 1435° „ „ 0,0635 „

[1]) Chicagoer Kongreß 1893; Electrician (2) **32**, 117 (1893).
[2]) Lit. siehe S. 134.
[3]) Proc. Roy. Soc. **56**, 262 (1894).
[4]) Phys. Z. **3**, 97 (1901/1902).

Durch Extrapolation würde sich daraus ergeben

bei 1500° C etwa 0,1 HK
„ 1700° „ „ 0,5 „
„ 1800° „ „ 1,0 „

D. Vergleichende Versuche zwischen den einzelnen Lichteinheiten.

§ 66. Auswertung der Vdescribe Violleschen Einheit.

Nach Messungen von Violle[1]) ist

1 Violle = 2,08 Carcel . . . . 1)
1 Violle = 19,5 HK . . . . 2)

Da $^1/_{20}$ Violle *mit 1 bougie décimale bezeichnet wird,*
so ist nach Gleichung 1) und 2)

1 Carcel = 9,6 bougies décimales . . . . . 3)
1 HK = 1,02 bougies décimales . . . . . 4)

Demnach würde sein

1 HK = 0,106 Carcel . . . . 5)

Die letztere Zahl ist aber nicht richtig, wie die im folgenden Paragraphen zu besprechenden einwandsfreieren Vergleiche zeigen. Aber auch die Gleichungen 2) und 4) sind nach Lummer, welcher

1 Violle = 26 HK

erhielt (S. 134), nicht richtig. Demnach wären auch die Gleichungen 1) und 3) nicht richtig.

§ 67. Vergleich der Hefnerkerze mit den gebräuchlichsten Lichteinheiten.

Die Zahlen * sind Ergebnisse von Versuchen, die gemäß einem Beschlusse der Internationalen Lichtmeßkommission (S. 148) in Deutschland[2]), Frankreich[3]) und England[4]) ausgeführt sind; außerdem wurden in Frankreich[3]) noch die Zahlen † gefunden.

a) Die Lampen brennen in derselben Luft. Die Lampen werden entweder direkt gegeneinander (z. B. Zahlen †) oder, was viel genauer ist, unmittelbar nacheinander mit einer konstanten Lampe (Vergleichslampe, S. 151) verglichen.

---

[1]) Congrès International de Photographie 1889, Rapport et documents, p. 56.

[2]) Reichsanstalt (Liebenthal); J. f. G. u. W. **49**, 559 (1906).

[3]) Laboratoire central d'Électricité (Laporte und Jouast, Zahlen * und †) und Laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers (Pérot und Janet, Zahlen †); Bull. Soc. Int. El. (2) **6**, 375 (1906).

[4]) National Physical Laboratory (Paterson); Electrician (2) **58**, 560 (1906/1907).

Deutsche Vereinskerze (V. K.). Nach Messungen, die von Lummer und Brodhun[1]) und von der Lichtmeßkommission des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern ausgeführt wurden, ist von diesem Verein in Vereinbarung mit der Reichsanstalt angenommen[2])

$$\frac{\text{Lichtst. der V. K. bei 50 mm Flammenh.}}{\text{Lichtst. der Hefnerlampe}} = 1{,}20 \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Englische Kerze (E. K.). Es nimmt die Reichsanstalt den Mittelwert aus einer Reihe anscheinend zuverlässiger Beobachtungen[3])

$$\frac{\text{Lichtst. der E. K. bei 45 mm Flammenh.}}{\text{Lichtst. der Hefnerlampe}} = 1{,}14 \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Carcellampe (Ca.). Es fanden für

$$\frac{\text{Lichtst. der Ca.}}{\text{Lichtst. der Hefnerlampe}}$$

Niederl. Lichtmeßkommission[4])	10,4	3)
Durand und Jigouzo[5])	11.1	
Laporte[6])	10,9	
Lecomte[7])	10,5	
Reichsanstalt	10,8*	
Französische Laboratorien	10,80†	

10-Kerzen-Pentanlampe (10 Pe.). Es fanden für

$$\frac{\text{Lichtst. der 10 Pe.}}{\text{Lichtst. der Hefnerlampe}}$$

Reichsanstalt (mittl. Luftdruck 759 mm) . .	11,0*	4)
Französische Laboratorien	10,79†	

Folgerungen. Es versteht die Reichsanstalt unter Hefnerkerze (S. 119) die Lichtstärke der Hefnerlampe bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 8,8 Liter auf 1 cbm trockene, kohlensäurefreie Luft und bei einem Luftdruck von 760 mm. Nun sind die Pentandochtlampe (S. 126), die 10-Kerzen-Pentanlampe (S. 128) und, soweit sich bei den beträchtlichen Lichtstärkenschwankungen erkennen läßt (Anm. 2, S. 140), auch die Carcellampe in der gleichen Weise wie die Hefnerlampe (S. 118)

---

[1]) Z. f. Instrk. **10**, 119 (1890).
[2]) J. f. G. u. W. **33**, 398 u. 597 (1890).
[3]) Z. f. Instrk. **13**, 257 (1893); J. f. G. u. W. **36**, 341 (1893).
[4]) J. f. G. u. W. **37**, 613 (1894).
[5]) Von Laporte mitgeteilt (s. Anm. 6).
[6]) L'Éclair. électr. **15**, 295 (1898); vgl. auch Blondin, ibid. **15**, 300 (1898) und Referat von Krüss, J. f. G. u. W. **41**, 625 (1898).
[7]) J. f. G. u. W. **47**, 227 (1904).

von der Feuchtigkeit abhängig. Dies dürfte auch für die Kerzen der Fall sein. Dann ist

V. K. (50 mm Flammenh., 8,8 Liter) = 1,20 HK
E. K. (45 „ „ 8,8 „) = 1,14 „ . . 5)

	nach deutsch.	franz. Messungen	
Ca. (etwa 8,8 Liter)	= **10,8*** HK	**10,80†** HK	6)
10 Pe. (8,8 Liter)	= 11,0* „ (760 mm)	10,79† „	

Im National Physical Laboratory wird die Lichtstärke der 10-Kerzen-Pentanlampe bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 10 Litern als normal angenommen. Nach vorstehendem ist somit

	nach deutsch.	franz. Messungen	
10 Pe. (10 Liter)	= **10,9*** HK (760 mm)	**10,72†** HK . .	7)

Aus seinen Messungen zieht Laporte folgenden wichtigen Schluß: Nehmen wir die Zahl 1 Carcel = 10,9 HK, so würde sich unter Benutzung des nicht sichergestellten Umrechnungsfaktors 3), (S. 140)

1 HK = 0,885 bougies décimales . . . . . 8)

statt = 1,02 bougies décimales, also ein um etwa 13 Proz. kleinerer Wert als früher angenommen war, ergeben.

b) **Die Lampen brennen in verschiedener Luft.** Die Lampen werden zu verschiedenen Zeiten mit einer konstanten Vergleichslampe verglichen, und es werden die Ergebnisse der Pentanlampen auf normale Feuchtigkeit reduziert. Es ergibt sich

nach S. 126 Pentandochtlampe (8,8 Liter) = 1,17 HK . . 9)

	nach franz.	engl. Messungen	
Ca. (mittl. Feuchtigkeit)	= **10,76*** HK	**10,74*** HK	. . 10)
10 Pe. (10 Liter)	= **10,76*** „	**10,94*** „ (760 mm)	

c) **Indirekter Vergleich.** Beim Vergleiche der Carcellampe mit zwei von der Reichsanstalt geprüften elektrischen Glühlampen von 10 und 16 HK fand Laporte (Ann. 6, S. 141) im Mittel

1 Ca. = 10,9 HK.

d) **Bemerkungen.** Zu den vergleichenden Messungen der Reichsanstalt wurden zwei Carcellampen und zwei 10-Kerzen-Pentanlampen benutzt, welche vom Deutschen Verein von Gas- und Wasserfachmännern zur Verfügung gestellt waren.

α) Carcellampe. Jeder Lampe war eine Kanne mit Colzaöl beigegeben. Der Brennstoff wurde abwechselnd in beiden Lampen gebrannt. Die Lampen wurden etwa 30 Minuten nach dem Anzünden entsprechend den Erfahrungen von Laporte (S. 109) einreguliert. Mit dem Messen wurde etwa 50 Minuten nach dem Anzünden begonnen. Im Mittel aus 28 Messungsreihen (s. S. 109), die sich je aus min-

destens vier unmittelbar aufeinander folgenden Messungen zusammensetzten, ergab sich die Verhältniszahl 10,8, und es betrug

die größte Abweichung vom Mittelwert . . .	4,6	Proz.
die mittlere „ „ „ . .	± 1,8	„

Die Zahlen, aus welchen der Mittelwert 10,8 abgeleitet wurde, sind Mittelwerte aus Größen, welche bis zu 10 Proz. voneinander abweichen.

Die Messungsreihen sind hierbei zeitlich so verteilt, daß sich der Mittelwert 10.8 auf mittlere Feuchtigkeit (etwa 8,8 Liter) bezieht.

β) 10-Kerzen-Pentanlampe. Der einen der beiden Lampen war ein Zeugnis der Gas Referees zu London über die Richtigkeit der Abmessungen der Lampe beigegeben. Bei der anderen Lampe wurden Abweichungen von den durch die Gas Referees angegebenen Abmessungen nicht gefunden. Mit der Messung wurde begonnen, sobald die Lichtstärke konstant geworden war, was meistens schon etwa 10 Minuten nach dem Anzünden eintritt. Im Mittel aus 47 Messungsreihen mit den Pentansorten 1 und 2 (S. 129 und 130) ergab sich der Mittelwert 11,0, und es betrug

die größte Abweichung vom Mittelwert . . .	2,2	Proz.
die mittlere „ „ „ . .	± 1,1	„

Wegen der Einzelheiten der vergleichenden französischen und englischen Messungen muß auf die Originalabhandlungen verwiesen werden.

Die Ergebnisse der in den drei verschiedenen Ländern ausgeführten Versuche stimmen nach vorstehendem recht gut miteinander überein. Bemerkenswert ist, daß nach den französischen Messungen* [Gl. 10)] die 10-Kerzen-Pentanlampe genau gleich der Carcellampe ist, während die erstere nach den deutschen um 1 Proz., nach den englischen um 1,8 Proz. lichtstärker ist. Als Verhältnis der Carcellampe zur Hefnerlampe wurden in den drei Ländern überraschend übereinstimmende Werte gefunden.

§ 68. Tabellarische Übersicht über ältere Vergleichungen von Lichteinheiten.

Einen recht vollständigen Überblick über die bis 1903 ermittelten gegenseitigen Beziehungen einer größeren Anzahl von Lichteinheiten gibt Bunte[1]) (vgl. S. 148) in Tabelle I, in welcher die fettgedruckten Zahlen die direkten Ergebnisse der Messungen oder deren Reziproke, dagegen die gewöhnlichen Ziffern diejenigen Werte angeben, welche aus den einzelnen Beobachtungsreihen durch Umrechnung erhalten werden.

---

[1]) J. f. G. u. W. **46**, 1005 (1903).

Tabelle I.

(Die fetten Zahlen sind die Ergebnisse der Messungen oder deren Reziproke.)

	HK	V. K.	M. K.	E. K.	1 Pe.	10 Pe.	Äther-Benzol Standard	Carcel	Violle (Unité)	Pyr Bougies décimales
Hefnerkerze HK	1	**0,833** [1])	—	**0,877** [2])	**0,85** [3])	—	0,60	0,092	0,044	0,89
		—	—	**0,9213** [11])	—	—	—	0,096 [11])	—	—
		—	—	—	—	—	—	**0,092** [15])	—	—
Deutsche Vereinskerze V. K.	1,20 [1])	1	—	1,05	1,03	—	0,72	0,110	0,054	1,07
	—		**0,887** [12])	**0,977** [12])	—	—	—	**0,102** [12])	—	—
	—		—	—	—	—	—	**0,133** [8])	—	—
Münchener Kerze (Stearin) M. K.	1,35	**1,128** [12])	1	**1,102** [12])	—	—	—	**0,115** [12])	—	—
	—	—		—	—	—	—	**0,154** [8])	—	—
Standard Sperm Candle (Englische Kerze) E. K.	**1,14** [2])	0,95	—	1	**0,974** [3])	—	—	0,105 [14])	0,051	1,01
	—	**1,023** [12])	**0,907** [12])		—	—	—	**0,104** [12])	—	—
	—	—	—		—	—	—	**0,105** [4])	—	—
	—	—	—		—	—	—	**0,105** [5])	—	—
	—	—	—		—	—	—	**0,106** [6])	—	—
	—	—	—		—	—	—	**0,104** [13])	—	—
	—	—	—		—	—	—	**0,108** [7])	—	—
	—	—	—		—	—	—	**0,120** [8])	—	—
	1,0854 [11])	0,90	—		—	—	**0,68** [11])	**0,104** [11])	—	—
1 candle-Pentandochtlampe 1 Pe. (Vernon Harcourt)	**1,17** [3])	0,975	—	**1,026** [3])	1	—	0,70	0,108	0,052	1,04
10 candle-Pentanluftgaslampe 10 Pe. (Vernon Harcourt)	—	—	—	—	—	1	—	**0,125** [10])	—	—

Äther-Benzollampe	1,69	1,41	—	**1,48**[11])	1,44	—	**1**	0,155	0,075	1,5
	—	**9,826**[12])	**8,715**[12])	**9,6**[12])	—	—	—		—	—
	10,8	9,0	—	**9,5**[4])	9,3	—	6,5		—	—
	—	—	—	**9,6**[5])	—	—	—		—	—
	—	—	—	**9,4**[6])	—	—	—		—	—
Carcel	—	—	—	**9,66**[13])	—	—	—	**1**	—	—
	—	—	—	**9,3**[7])	—	—	—		—	—
	—	**7,5**[8])	**6,5**[8])	**8,3**[8])	—	**8,0**[10])	—		—	—
	10,45	—	—	**9,631**[11])	—	—	—		—	—
	—	—	—	—	—	—	—		**0,481**[9])	9,62
	10,91	—	—	—	—	—	—		—	—
Violle[9]) (Platin-Einheit)	22,6	18,8	—	19,8	19,3	—	13,5	**2,08**[9])	**1**	20
Bougie décimale (Pyr) = $^1/_{20}$ Violle	1,13	0,94	—	0,99	0,96	—	0,67	0,104	0,05	**1**

[1]) Deutsche Lichtmeßkommission und Physikalisch-Technische Reichsanstalt, Journ. f. Gasbel. 1890, S. 597; 1893, S. 342. Krüss, Bericht der Lichtmeßkommission (München 1897), S. 73 und 75. — [2]) Deutsche Lichtmeßkommission, Journ. f. Gasbel. 1890, S. 573; 1893, S. 342. Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Journ. f. Gasbel. 1895, S. 511. Krüss, l. c., S. 73. — [3]) Liebenthal (Physikal.-Techn. Reichsanstalt), Journ. f. Gasbel. 1895, S. 511. — [4]) Dibdin, Public Lighting by Gas and Electricity, London 1902, S. 33. — [5]) Kirkham und Sugg; vgl. Schilling, Handbuch der Gasbeleuchtung, München 1879, S. 214, und W. Sugg u. Co., Gas Engineers Pocket Almanac 1902, S. 119. — [6]) Sugg; vgl. W. Sugg u. Co., Gas Engineers Pocket Almanac 1902, S. 119. — [7]) Nach Le Blanc, Inspektor des Beleuchtungswesens in Paris; vgl. Schillings Handbuch 1879. S. 214. — [8]) Monnier, Vortrag im Französischen Gasfachmännerverein 1883; Journ. f. Gasbel. 1883, S. 758. — [9]) Violle, Des étalons photométriques. Verhandlungen des Französischen Gasfachmännervereins 1884, S. 366; Journ. f. Gasbel. 1884, S. 764. — [10]) Nach Monnier; vgl. Violle, l. c., S. 353, Fußnote. — [11]) Rapport der Niederländischen Photometrie-Kommissie 1893, S. 62, 70 u. 73; Journ. f. Gasbel. 1894, S. 617. — [12]) Messungen von N. H. Schilling; vgl. Handbuch d. Gasbel. 1879, S. 214. — [13]) Webber und Rowden, Journ. of Gas-lighting 1869, S. 65. — [14]) *Mittelwert mit Ausschluß von* [8]). — [15]) Laporte, Journ. des Usines à Gaz 1898, S. 204; Journ. f. Gasbel. 1898, S. 624.

In Tabelle II hat Bunte die sich aus Tabelle I ergebenden zuverlässigsten Werte für die jetzt im Gebrauch befindlichen Lichteinheiten zusammengestellt.

Tabelle II.

	HK	V. K.	E. K.	1 Pe.	10 Pe.	Carcel
Hefnerkerze	**1**	**0,833**	**0,877**	**0,855**	(0,088)	0,092
Vereinskerze	**1,20**	**1**	1,05	1,03	(0,105)	0,110
Englische Kerze	**1,14**	0,95	**1**	0,97	(0,1)	**0,105**
Pentandochtlampe . . .	**1,17**	0,97	1,03	**1**	(0,103)	0,107
10-Kerzen-Pentanlampe .	(11,4)	(9,50)	(10,0)	(9,7)	**1**	(1,05)
Carcellampe	10,87	9,05	**9,53**	9,29	(0,95)	**1**

Von den Zahlen der zweiten Vertikalspalte, aus denen die übrigen Zahlen abgeleitet wurden, waren 1903 nur die fettgedruckten sichergestellt. Nach den S. 141 und 142 mitgeteilten mit † und * bezeichneten Ergebnissen der in Deutschland, Frankreich und England ausgeführten vergleichenden Untersuchungen ist auch die Zahl für die Carcellampe bis auf etwa 1 Proz. genau. Dagegen ist der für die 10-Kerzen-Pentanlampe angegebene Wert 11.4, welchen man mit Rücksicht auf Gleichung 2), S. 141, hätte erwarten dürfen, nach diesen Untersuchungen *um etwa 5 Proz. zu groß*, mit anderen Worten: die neue englische, mittels der 10-Kerzen-Pentanlampe abgeleitete Kerze — Paterson nennt sie Pentaneinheit — ist um etwa 5 Proz. kleiner als die alte, durch die Spermacetikerze festgelegte englische Kerze. In Tabelle II sind deshalb die auf die 10-Kerzen-Pentanlampe bezüglichen Zahlen von uns — abweichend von Bunte — eingeklammert.

(Siehe Tabelle XII auf S. 434.)

E. Vereinbarungen über photometrische Größen und Einheiten.

§ 69. Geschichtliches über internationale Vereinbarungen.

Die ersten internationalen Besprechungen über photometrische Fragen erfolgten auf dem Pariser Elektrikerkongreß, der aus Anlaß der ersten elektrotechnischen Ausstellung 1881 zu Paris tagte. Es wurde beschlossen, für die Prüfung der ausgestellten Lampen das Carcel als Lichtmaß zu benutzen. Ferner wurde eine internationale Kommission gewählt, welche neben den im Gebrauch befindlichen Lichteinheiten auch noch die von Violle dem Kongreß vorgeschlagene Platinlichteinheit (S. 133) prüfen sollte; außerdem wurde sie mit der Bearbeitung der Frage nach den elektrischen Einheiten betraut. 1882 trat die Kommission als „Internationale Konferenz zur Bestimmung der

elektrischen Einheiten" zum ersten Male zusammen, ohne eine Einigung zu erzielen. Bei ihrer zweiten Zusammenkunft, welche 1884 ebenfalls zu Paris erfolgte, wurde, obgleich W. v. Siemens sehr warm für die Hefnerlampe eintrat, als Lichteinheit die Viollesche Einheit angenommen. Auf dem internationalen Pariser Kongreß vom Jahre 1889 wurde als Einheit der Lichtstärke der zwanzigste Teil der Violleschen Einheit unter dem Namen

bougie décimale

angenommen. Der internationale Elektrikerkongreß zu Chicago vom Jahre 1893 setzte wieder eine Beratung über die Viollesche Einheit auf seine Tagesordnung. Auf Grund der ungünstigen Erfahrungen der Reichsanstalt, über welche Lummer persönlich berichtete, wurde jedoch von einer erneuten Aufstellung dieser Einheit Abstand genommen und die Beschlußfassung über eine solche bis zum nächsten Elektrikerkongreß vertagt.

Als Beleuchtungseinheit wurde in Chicago die Beleuchtung vorgeschlagen, welche durch eine bougie décimale auf einer in 1 m Entfernung senkrecht zu den Strahlen befindlichen Fläche erzeugt wird. Dieser Vorschlag fand indessen keine Anwendung. Schon vorher waren entsprechende Beleuchtungseinheiten, z. B. von Weber und von Preece die auf die deutsche Kerze und das Meter bzw. auf die englische Kerze und den englischen Fuß bezügliche unter der Bezeichnung Meterkerze bzw. candle-foot, vorgeschlagen.

Dem *internationalen Elektrikerkongreß,* der im August 1896 in Genf tagte, gebührt das Verdienst, auf Grund einer ausführlichen Denkschrift von Blondel [1]) ein vollständig definiertes System der photometrischen Größen und Einheiten aufgestellt zu haben. Vom theoretischen Standpunkte aus müßte nach Blondel der *Lichtstrom* als Fundamentalgröße dienen; unter Lichtstrom versteht er, wie bereits auf S. 68 bemerkt wurde, den vom Auge empfundenen Teilbetrag des Energiestromes der leuchtenden Strahlen. Aus praktischen Gründen empfiehlt es sich jedoch, als Fundamentalgröße die *Lichtstärke* zu nehmen, weil sich ihre Einheit durch eine Lichtquelle darstellen läßt. Es entspann sich im Kongreß [2]) eine sehr lebhafte Diskussion über die Wahl der Lichteinheit. Als theoretische Einheit wurde trotz des lebhaftesten Widerspruchs der deutschen Delegierten, insbesondere des Herrn v. Hefner-Alteneck, wieder die bougie décimale angenommen. Da sich diese Einheit jedoch praktisch nur sehr schwer herstellen läßt, wurde für praktische Zwecke die *Lichtstärke der Hefnerlampe* als Einheit gewählt. Hierbei wurde von der von Laporte später [Gl. 8), S. 142] als unrichtig nachgewiesenen Annahme ausgegangen, daß beide Einheiten bis auf

[1]) Rapport sur les unités photométriques. L'Éclair. électr. 8, 341 (1896); Z. f. Bel. 2, 359 (1896).

[2]) Bericht von v. Hefner-Alteneck, s. E. T. Z. 17, 754 (1896).

2 Proz. übereinstimmten. Bezüglich der übrigen photometrischen Größen und Einheiten wurde schnell eine Einigung erzielt.

In Anlehnung an diese Beschlüsse in Genf haben sich sodann die größten an der Lichtmessung interessierten Vereine in Deutschland (der Deutsche Verein von Gas- und Wasserfachmännern, der Elektrotechnische Verein, der Verband deutscher Elektrotechniker) unter Mitwirkung der Reichsanstalt mit diesen Fragen befaßt. Es wurden sämtliche Beschlüsse des Kongresses angenommen, bis auf den auf die Lichteinheit bezüglichen, und zwar wurde die bougie décimale wegen ihres unsicheren Wertes ausgeschieden und an ihre Stelle ganz allgemein die Lichtstärke der Hefnerlampe gesetzt, welcher man den Namen „*Hefnerkerze*“ gab. Über diese Festsetzungen [1]) handelt der nächste Paragraph.

Die Genfer Beschlüsse bezüglich der Wahl einer internationalen Lichteinheit haben jedoch eine Einheitlichkeit auf diesem Gebiete nicht herbeigeführt. Denn die Hefnerlampe ist noch heute als alleiniges Lichtmaß nur in Deutschland in Gebrauch, während in Frankreich gewöhnlich die Carcellampe, in England die englische Kerze und seit 1898 auch die 10-Kerzen-Pentanlampe als Einheitslampe benutzt wird.

Die Internationale Lichtmeßkommission, welche bei Gelegenheit der Pariser Weltausstellung von 1900 von dem ersten internationalen Kongreß von Gasingenieuren gebildet wurde, beschäftigte sich deshalb in ihrer Sitzung, die im Juni 1903 in Zürich [2]) stattfand, wieder mit der Frage nach einer internationalen Regelung der Lichteinheiten, und zwar in Anlehnung an die beiden bereits auf S. 144 bis 146 mitgeteilten Tabellen I und II, welche Bunte zu diesem Zwecke aufgestellt hatte.

In der Erkenntnis, daß vorläufig keine Aussicht auf die Einführung einer wirklich allgemein gebräuchlichen Lichteinheit vorhanden ist, beschränkte sich die Lichtmeßkommission in Zürich darauf, allgemein anzuerkennende Verhältniszahlen zwischen den in den verschiedenen Ländern benutzten Lichteinheiten zu erstreben. Es wurde beschlossen:

1. die Zahlen der Tabelle II vorläufig für Umrechnungen zugrunde zu legen;

2. neue vergleichende Versuche zwischen Hefnerlampe, 10-Kerzen-Pentanlampe und Carcellampe sowohl in Deutschland wie auch in Frankreich und England anzustellen.

Die Ergebnisse dieser neuen Vergleiche sind bereits S. 141 und 142 mitgeteilt.

Die Internationale Lichtmeßkommission wird demnächst wieder zusammentreten und dann endgültige Verhältniszahlen festsetzen.

(Siehe Tabelle XII auf S. 434.)

[1]) J. f. G. u. W. **40**, 548 (1897); E. T. Z. **18**, 474 (1897); vgl. auch L. Weber, E. T. Z. **18**, 91 (1897).

[2]) Offizielles Protokoll, s. J. f. G. u. W. **46**, 988 (1903).

§ 70. Deutsche Beschlüsse über photometrische Größen und Einheiten.

1. *Die photometrischen Größen haben als Basis die Lichtstärke einer punktförmigen Lichtquelle.*

2. Die Lichtstärke (französisch: intensité lumineuse, englisch: intensity of light) wird mit J bezeichnet. Die Einheit der Lichtstärke ist die *Hefnerkerze; das Abkürzungszeichen ist* HK.

So sagt man beispielsweise: eine Lichtquelle hat die Lichtstärke $J = 10$ HK.

3. Der Lichtstrom (französisch: flux lumineux, englisch: flux of light) wird mit Φ bezeichnet und definiert durch

$$\Phi = J\omega = \frac{J s \cos i}{r^2} \text{ [Gl. 2) S. 74 und 7) S. 75]} \quad . \quad . \quad 1)$$

worin r in Metern und s in Quadratmetern gezählt wird. Gleichung 1) gilt zunächst nur für ein unendlich kleines s; sie ist auch noch für eine kleine ebene Fläche s gültig (vgl. § 32b, S. 90), deren Dimensionen gegen r hinreichend klein sind.

Es wird $\Phi = 1$ für $J = 1$ HK; $\omega = 1$.

Die Einheit des Lichtstromes ist also der von der punktförmigen Lichtquelle 1 HK in die Einheit des räumlichen Winkels gesandte Lichtstrom. Sie wird *Lumen* genannt; *das Abkürzungszeichen ist Lm.*

Denkt man sich um die punktförmige Lichtquelle, welche nach allen Richtungen die Lichtstärke 1 HK besitzt, eine Kugel mit dem Radius 1 m beschrieben und diese Kugel in Flächenstücke von je 1 qm Inhalt geteilt, so empfängt jedes Flächenstück den Lichtstrom 1 Lm. Der auf die ganze Kugel (in den Raumwinkel 4π) übergehende Lichtstrom ist 4π Lm. Ist die Lichtstärke der Lichtquelle nach allen Richtungen gleich J, so ist der Gesamtlichtstrom gleich $4\pi J$ Lm.

4. Die Beleuchtung[1]) (französisch: éclairement, englisch: illumination) wird mit E bezeichnet und definiert durch

$$E = \frac{\Phi}{s} = \frac{J \cos i}{r^2} \text{ [Gl. 3) S. 74 und 8) S. 75]} \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

wo s in Quadratmetern und r in Metern gemessen wird.

Die Einheit der Beleuchtung wird erhalten, wenn $J = 1$ HK; $i = 0$ und $r = 1$ m ist. Sie ist also vorhanden, wenn eine punktförmige Lichtquelle 1 HK ein ebenes, 1 m entferntes kleines Flächen-

---

[1]) Die „indizierte Helligkeit" nach früherer Weberscher Bezeichnung.

stück s senkrecht beleuchtet. Sie wird 1 *Lux* oder auch wohl, wenn auch nicht ganz zutreffend, 1 Meterkerze genannt; *das Abkürzungszeichen ist Lx.*

5. Die Flächenhelle[1]) (französisch: éclat intrinsèque, englisch: intrinsec brightness) wird mit e bezeichnet und definiert durch

$$e = \frac{J}{\sigma \cos \varepsilon} \text{ [Gleichung 2) S. 76]} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

wo σ in Quadratcentimetern gemessen wird. Die Gleichung ist zunächst nur für ein unendlich kleines σ gültig; sie ist auch noch für eine kleine ebene Fläche σ gültig [vgl. Gleichung 5) S. 89], deren Dimensionen gegen r hinreichend klein sind.

Die Einheit der Flächenhelle[2]) ist vorhanden, wenn $J = 1$ HK, $\sigma \cos \varepsilon = 1$ qcm ist, also wenn die Lichtstärke pro Quadratcentimeter der scheinbaren Oberfläche 1 HK beträgt. [Vgl. Gleichung 7), S. 90.]

e wird auch gleich 1, wenn $J = 1$ HK und speziell $\varepsilon = 0$, $\sigma = 1$ qcm ist. Die Einheit der Flächenhelle ist also auch vorhanden, wenn die Lichtstärke von 1 qcm ebene Oberfläche in zu ihr senkrechter Richtung 1 HK beträgt. Sie wird deshalb auch als *Kerze auf 1 qcm* bezeichnet.

6. Die Lichtabgabe (französisch: éclairage, englisch: lighting) wird mit Q bezeichnet. Sie ist der Lichtstrom, welcher in der Zeit $\mathfrak{T}$ ausgestrahlt wird. Einheit der Lichtabgabe ist das während einer Stunde ausgestrahlte Lumen; sie wird mit *Lumenstunde* bezeichnet. Strahlt eine Lichtquelle $\mathfrak{T}$ Stunden lang den Lichtstrom Φ Lumen aus, so ist die Lichtabgabe

$$Q = \Phi \mathfrak{T} \text{ Lumenstunden} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Eine *tabellarische Zusammenstellung* der Namen und Zeichen der photometrischen Größen und Einheiten s. Anhang, Tabelle V.

Beispiele. a) Eine Lichtquelle L beleuchte die in der Entfernung $r = 2$ m gelegene kleine ebene Fläche $s = 1{,}2$ qcm unter dem Einfallswinkel $i = 60^0$; die Lichtstärke von L in Richtung r sei $J = 50$ HK. Alsdann ist

1. nach Gleichung 1) der auf s auftreffende Lichtstrom

$$\Phi = \frac{50 \cdot 0{,}000\,12 \cdot \cos 60}{4} = 0{,}000\,75 \text{ Lm};$$

[1]) Die claritas visa Lamberts.

[2]) Als Einheit der Flächenhelle hatte Weber früher die Flächenhelle einer absolut weißen, vollkommen diffus reflektierenden Fläche vorgeschlagen, welche von 1 Kerze in 1 m Entfernung senkrecht beleuchtet wird; diese Webersche Einheit ist also 10000π mal so klein wie die jetzige Einheit der Flächenhelle (vgl. Gl. 1, S. 91 und Beispiel c in diesem Paragraphen).

2. nach Gleichung 2) die auf s erzeugte Beleuchtung

$$E = \frac{50 \cdot \cos 60}{4} = 6{,}25 \text{ Lx};$$

b) Eine ebene Fläche $\sigma = 3$ qcm besitze unter dem Ausstrahlungswinkel $\varepsilon = 60^0$ die Flächenhelle $e = 10$ HK. Alsdann ist die Lichtstärke unter ε nach Gleichung 3)

$$J = 3 \cdot 10 \cdot \cos 60 = 15 \text{ HK}.$$

Befolgt diese Fläche das $\cos \varepsilon$-Gesetz, so ist (vgl. das Beispiel auf S. 91) der in den äußeren Raumwinkel 2π ausgesandte Lichtstrom

$$\Phi = \pi \cdot 3 \cdot 10 = 94{,}25 \text{ Lm}.$$

c) Das vollständig diffus reflektierende Flächenelement σ empfange unter dem Einfallswinkel i die Beleuchtung $E = 50$ Lx; das diffuse Reflexionsvermögen für den Winkel i sei $M = 0{,}8$; dann ist (vgl. das Beispiel auf S. 92) die Flächenhelle von σ

$$e = \frac{0{,}8}{10\,000\,\pi} \cdot 50 = 0{,}001\,27 \text{ HK}.$$

Wenn das Flächenelement s in Beispiel a ebenfalls vollständig diffus reflektiert, so ist für $M = 0{,}8$ die Flächenhelle von s

$$e = \frac{0{,}8}{10\,000\,\pi} \cdot 6{,}25 = 0{,}000\,159 \text{ HK}.$$

Weitere Beispiele s. u. a. § 135 und 155.

F. Zwischenlichtquellen.

§ 71. Aufzählung der gebräuchlichsten Zwischenlichtquellen.

Wir wollen annehmen, daß wir ein solches Photometer haben, welches unmittelbar das Verhältnis der Lichtstärken zweier Lichtquellen zu messen gestattet. (Vgl. S. 159, Zeile 16 von unten.) Wir können dann eine Lichtmessung im eigentlichen Sinne ausführen, wenn von den beiden Lampen die eine die zu messende, d. h. diejenige, deren Lichtstärke gesucht wird, und die andere die Einheitslampe ist. Das Arbeiten mit der Einheitslampe ist jedoch wegen der dabei zu erfüllenden Bedingungen zum mindesten zeitraubend; außerdem ist der Brennstoff meistens teuer. Ferner läßt sich eine sehr starke Lichtquelle in kleineren Beobachtungsräumen ohne Hilfsmittel zum Abschwächen nicht direkt mit der Einheitslampe, deren Lichtstärke verhältnismäßig klein ist, vergleichen. Aus diesen (und noch anderen) Gründen wird für umfangreiche und ganz besonders für *genaue* Untersuchungen noch eine *dritte* möglichst konstante Lichtquelle in der Weise herangezogen, daß die zu messende Lampe und die Einheitslampe getrennt mit dieser dritten Lampe verglichen werden (Substitutionsverfahren). Die letztere Lampe wird dann *Vergleichslampe* oder Hilfslichtquelle genannt. Hält

sich diese nur für kürzere Zeit konstant, so muß sie häufiger, mindestens vor und nach der zu messenden Lampe, mit der Einheitslampe verglichen werden. Ist die Lichtstärke der Vergleichslampe für längere Zeit verbürgt, so braucht der Vergleich mit der Einheitslampe nur in größeren Zeitabschnitten wiederholt zu werden. Eine solche Lampe kann dann ganz allgemein unmittelbar an Stelle der Einheitslampe verwendet werden und werde bei dieser Verwendungsart als *Normallampe* bezeichnet. (Ausführlicheres s. S. 157 bis 159, Beispiele a) und b)). Vergleichs- und Normallampen wollen wir zusammenfassend als *Zwischenlichtquellen* bezeichnen.

Als Zwischenlichtquellen kommen hauptsächlich die folgenden in Betracht:

a) Petroleumrundbrenner ohne Brennscheibe, die man etwa 20 Minuten nach dem Anzünden auf die höchste zu erreichende Lichtstärke bringt, so daß die Flamme gerade vor dem Rußen steht (§ 151). Z. B. die Kosmosbrenner von Wild und Wessel, sowie die Patentreformrundbrenner der Deutsch-Russischen Naphta-Importgesellschaft halten sich oft während mehrerer Stunden konstant.

Die Petroleumlampen wurden zuerst von Rüdorff empfohlen und werden auch noch heute vielfach angewandt.

b) Benzinkerzen von konstanter Flammenhöhe; dieselben wurden von Eitner und v. Hefner-Alteneck vorgeschlagen und finden z. B. im Weberschen Photometer (S. 184) Verwendung.

c) Argandbrenner mit ausgeblendeter Flamme (Methvenlampe, S. 109).

d) Gasflammen, welche mit Gasdruckregulator oder Hahn auf konstanter Flammenhöhe erhalten werden (Giroudlampe, S. 110; Argandbrenner).

e) Auf konstantem Gasverbrauch erhaltene kleine Gasglühlichtapparate, sogenannte Liliput- oder Juwelbrenner, welche vor der Prüfung schon mehrere hundert Stunden gebrannt haben. Vgl. § 158.

f) Elektrische Kohlenfadenglühlampen, die man mit Akkumulatoren speist und auf konstanter Spannung oder Stromstärke hält. Die elektrischen Messungen müssen sehr genau sein, da sich die Lichtstärke hier je nach der Beanspruchung um etwa 6 bis 8 Proz. ändert, wenn sich die Stromstärke oder Spannung um 1 Proz. ändert. Die elektrischen Lampen wurden von Lummer und Brodhun [1]) auf Grund eingehender Konstanzprüfungen als Zwischenlichtquellen vorgeschlagen. Schon vorher hatten Preece [2]) und Uppenborn [3]) diese Lampen für denselben Zweck empfohlen, ohne jedoch nähere Versuche anzustellen.

---

[1]) Z. f. Instrk. **10**, 119 (1890).
[2]) Proc. Roy. Soc. **36**, 272 (1884).
[3]) Zentralbl. f. Elektrot. **12**, 128 (1890).

Für die laufenden Arbeiten wird von der Reichsanstalt unter Verwendung eines Lummer-Brodhunschen Photometers und einer geraden Photometerbank seit 1891 ein und dieselbe Vergleichslampe benutzt, welche in diesem Falle zugleich als Normallampe aufzufassen ist. Sie ist eine Lampe mit bügelförmigem Kohlenfaden, welche mit 65 Volt und 10 HK normal brennt; sie wird jedoch nur mit etwa 51 Volt gebrannt, bei welcher Spannung sie etwa 1,7 HK ergibt. Allerdings brennt die Lampe dann ebenso rötlich wie die Hefnerlampe, so daß ihre Farbe von der der gebräuchlichen Lichtquellen abweicht; aber dieser Übelstand wird dadurch ausgeglichen, daß zwischen dieselbe und den Photometerschirm eine bläuliche Glasplatte eingeschaltet wird, die möglichst Farbengleichheit der Photometerfelder herstellt (S. 231). Die Lampe wird auf *konstanter Stromstärke* gehalten; man hat dann eine ziemlich große Gewähr dafür, daß stets dieselbe Energie im Kohlenfaden verbraucht wird, während bei der Einregulierung auf konstante Spannung etwaige Änderungen des Übergangswiderstandes in der Lampe einen störenden Einfluß ausüben. Die Stromstärke wird nach der Kompensationsmethode (§ 140) einreguliert und bis auf 0,01 Proz. genau konstant gehalten, so daß die Lichtstärke hierdurch bis auf mindestens 0,1 Proz. konstant gehalten wird.

Die eben erwähnte Vergleichslampe der Reichsanstalt hat seit 1891 bis jetzt im ganzen etwa 18 000 Stunden gebrannt und sich *konstant* gehalten. Ihre Konstanz wird durch Vergleich mit einem *Satze gleichartiger konstanter Lampen*, welche nur während des Versuchs eingeschaltet werden, ferner durch direkten Vergleich mit der Hefnerlampe kontrolliert. (Vgl. S. 232.)

Die elektrischen Lampen haben sich immer mehr in der Praxis, und zwar nicht nur in elektrotechnischen Instituten, sondern auch in Gasanstalten, Gasglühlichtfabriken usw. eingebürgert. Leider aber läßt man sie in der Praxis meistens mit der normalen Spannung brennen, um möglichst Farbengleichheit mit den zu messenden Lampen zu erhalten. Durch die stärkere Beanspruchung wird die Konstanz herabgesetzt. Außerdem begeht man oft den Fehler, daß man sie vor der Benutzung nur kurze Zeit brennen läßt. *Vorschrift sollte sein, daß nur solche Lampen verwendet werden, welche vorher schon längere Zeit (mindestens 100 Stunden) gebrannt und sich während dieser Zeit konstant gehalten haben.* Den hierzu nötigen Satz von Glühlampen kann sich jeder leicht selbst herstellen, indem er eine größere Anzahl längere Zeit einschaltet, sie in bestimmten Zeitabständen (von etwa 25 Stunden) photometriert und nur die behält, die gute Konstanz zeigten.

Man verwendet vielfach 110 Volt-Lampen. Zu benutzen ist auch jede Spannung von etwa 20 bis 110 Volt. Bei zu geringer Spannung werden die Glühfäden zu kurz, so daß die Lötstellen der Fäden einen zu großen Einfluß haben; bei zu hoher Spannung werden sie für mittlere Lichtstärken sehr dünn und schwanken hin und her.

g) Elektrische Metallfadenlampen, insbesondere Osmiumlampen von mindestens 9 Volt, werden in jüngster Zeit vielfach mit gutem Erfolge benutzt.

Eine einmal als zuverlässig befundene elektrische Glühlampe braucht man nur von Zeit zu Zeit zu kontrollieren, dagegen müssen die unter a) bis e) aufgeführten Lampen mindestens vor und nach einer technischen Messung mit der Einheitslampe verglichen werden. Hieraus folgt:

Nur *elektrische Glühlampen sind zu Normallampen geeignet*, während die übrigen Lampen nur als Vergleichslampen zu verwenden sind. Von den Kohlenfadenglühlampen eignen sich am besten solche, die einen hufeisen- oder bügelförmigen Faden (Typen 2a und b, Fig. 160, § 146) besitzen, und zwar empfiehlt es sich, ihre Lichtstärke in zur Fadenebene senkrechter Richtung zu bestimmen. Über die bei Lampen mit schleifenförmigen Fäden (Type 3a, Fig. 160) zu benutzende Ausstrahlungsrichtung siehe § 146. Bei Lampen mit geraden Kohlenfäden geben Risse und Rillen in der röhrenförmigen Umhüllung oft so starke Schatten, daß eine Messung der Lichtstärke sehr erschwert, zuweilen sogar unmöglich gemacht wird. Ein weiterer Übelstand an diesen Lampen ist, daß sie häufig, wahrscheinlich infolge der Dehnung des Fadens durch die Feder, wenig konstant in der Lichtstärke sind.

Fünftes Kapitel.

Photometer (für gleichfarbige und nahezu gleichfarbige Lichtquellen).

A. Allgemeine Gesichtspunkte.

§ 72. Empfindlichkeit des Auges gegen kleine Helligkeits- und Kontrastunterschiede.

Zwei nebeneinander liegende beleuchtete diffuse Flächen a und b sollen dem beobachtenden Auge ursprünglich in der *gleichen* Helligkeit, S. 76, erscheinen. Wenn man dann die Helligkeit der einen Fläche etwa durch Nähern oder Entfernen der sie beleuchtenden Lichtquelle allmählich ändert, werden a und b zunächst noch nicht verschieden hell gesehen. Erst wenn sich die Helligkeit um einen gewissen Betrag Δ geändert hat, nimmt man gerade einen Unterschied in der Helligkeit wahr; es tritt alsdann die Empfindung eines Helligkeits-

unterschiedes über die Schwelle des Bewußtseins. Die Größe Δ heißt nach Fechner *Unterschiedsschwelle* oder Unterschiedsschwellenwert, während der zur Wahrnehmung einer Empfindung überhaupt erforderliche Reiz *Reizschwelle* oder Reizschwellenwert genannt wird. (Vgl. S. 65.) Δ ist keine Konstante, sondern ein von der Lage der beiden Flächen zueinander und von der absoluten Größe der Helligkeit abhängiger Bruchteil ψ der Helligkeit, also

$$\Delta = \psi h.$$

Der Bruchteil ψ werde als relative Unterschiedsschwelle bezeichnet. Bei gegebener Helligkeit h ist ψ am *kleinsten*, wenn die beiden Flächen in einer *scharfen Kante* unmittelbar aneinanderstoßen; bei gleicher Helligkeit verschwindet dann diese Kante vollständig, so daß die Flächen als eine einzige gleichmäßig leuchtende Fläche erscheinen. Geht man von sehr geringer Helligkeit aus, so nimmt ψ mit wachsender Helligkeit zunächst ziemlich rasch, hierauf immer langsamer ab, bleibt dann für einen ziemlich großen Bereich der Helligkeit konstant und nimmt bei weiterer Zunahme der Helligkeit schließlich wieder zu.

Nun versteht man unter *Unterschiedsempfindlichkeit* den Quotienten aus einer von den zugrunde gelegten Einheiten abhängigen Konstanten und der Größe ψ, also den Wert

$$\frac{\text{const}}{\psi}.$$

Dementsprechend können wir auch sagen:

Die Empfindlichkeit des Auges gegen Helligkeitsunterschiede ist bei geringer Helligkeit gering; sie nimmt mit wachsender Helligkeit zu und erreicht ihr *Maximum*, wenn die Helligkeit eine mittlere ist. Bei sehr großer Helligkeit nimmt die Empfindlichkeit wieder ab. Bouguer war der erste, welcher fand, daß ψ ein nahezu konstanter Bruchteil der ganzen Helligkeit sei. Dieses Gesetz wurde später von Steinheil, Masson, Arago, Volkmann wiedergefunden und von Fechner (S. 156) ausführlich behandelt.

Für die Größe des kleinsten, also den *günstigsten Bedingungen (scharfe Grenzlinie, mittlere Helligkeit)* entsprechenden Bruchteiles ψ fanden Bouguer $^1/_{64}$, Fechner $^1/_{100}$, Arago[1]) bis $^1/_{131}$, Masson bis $^1/_{120}$, Helmholtz $^7/_{1000}$, König und Brodhun $^{16}/_{1000}$. Als Mittelwert dürfen wir deshalb etwa $^1/_{100}$ (= 1 Proz.) annehmen. Wenn also die ursprüngliche Beleuchtung zweier aus demselben Stücke herausgeschnittener Flächen a und b z. B. 10 bzw. 30 Lux beträgt, so muß man, um eben eine Zunahme in der Helligkeit zu bemerken, die Beleuchtung von a oder b um 0,1 bzw. 0,3 Lux ändern.

---

[1]) Arago fand, daß die Empfindlichkeit bei mäßiger Bewegung der Grenze zwischen den beiden zu vergleichenden Flächen vergrößert wird; auf diesen Fall bezieht sich obige Zahl.

Mit anderen Worten: *das Auge ist imstande, die Helligkeiten zweier Flächen bis auf etwa 1 Proz. genau zu vergleichen.*

Mit einer nahezu doppelt so großen Genauigkeit[1]) wie eben angegeben, vermag das Auge unter den günstigsten Bedingungen zu beurteilen, wann zwei symmetrisch liegende beleuchtete Flächen a und b aus ihrer gleichfalls beleuchteten Umgebung A und B gleich hell oder dunkel hervortreten, d. h. gleich stark kontrastieren. Die günstigsten Bedingungen sind: die beiden Felder a und b müssen in *scharfer Kante* mit ihrer Umgebung zusammenstoßen; die Helligkeit muß eine *mittlere* sein; die Stärke des Kontrastes, d. h. der im Momente der Einstellung sich ergebende Helligkeitsunterschied zwischen a und A, sowie zwischen b und B muß etwa 3,5 Proz. betragen (vgl. S. 182).

§ 73. Weber-Fechnersches psychophysisches Gesetz.

Das Auge ist ohne Hilfsmittel nicht imstande, anzugeben, wievielmal die Lichtstärke einer Lichtquelle größer als die einer anderen oder wievielmal eine Fläche stärker als eine andere beleuchtet ist. Die Erfahrung lehrt nämlich, daß die Stärke der Empfindung nicht proportional der Helligkeit, sondern eine sehr verwickelte Funktion der Helligkeit ist. Nach dem Weber-Fechnerschen psychophysischen Gesetze hängen die Empfindungsstärke s und die Helligkeit h durch die Relation

$$s = c \log (h/h_0)$$

zusammen, wo c eine Konstante und h_0 den Reizschwellenwert bezeichnet. Wird h verdoppelt, so würde also s wachsen um $c \log 2$.

Das Gesetz wurde von Fechner durch Integration der Differentialgleichung

$$ds = c\, dh/h$$

abgeleitet, welche er unter der Voraussetzung aufstellte, daß innerhalb eines großen Intervalles der Helligkeit eben merkliche Empfindungsunterschiede den eben merklichen Helligkeitsunterschieden proportional seien. Dieses Gesetz gibt jedoch nur ein ungefähres Bild des Abhängigkeitsverhältnisses.

§ 74. Prinzip der photometrischen Messungen.

Die Fähigkeit des Auges, kleine Unterschiede in der Helligkeit zu erkennen, bildet die Grundlage für die messende Vergleichung von Lichtstärken usw. Um diese Fähigkeit auszunutzen, bedarf man eines Hilfsapparates, eines sogenannten *Photometers.* Das Prinzip der Mes-

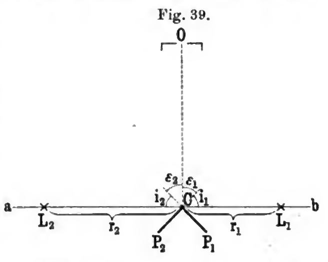
[1]) Nach Lippich [Wiener Ber. **105** (2), 317 (1896)] wird die größere Genauigkeit nicht durch eine größere Empfindlichkeit des Auges gegen Kontrastunterschiede, sondern durch die bessere Einrichtung des Gesichtsfeldes erreicht.

sung *(Gleichheitsprinzip)* ist dabei gewöhnlich folgendes: Man beleuchtet zwei diffus leuchtende Flächen durch je eine der beiden zu vergleichenden Lichtquellen, ändert durch ein optisches Verfahren *meßbar* die Helligkeiten dieser Flächen, bis sie gleich geworden sind, und berechnet mittels des Gesetzes der Lichtschwächung das Verhältnis der Lichtstärken [1]).

Beispiel a). Direkte Methode.

Als Beispiel diene die Anordnung von Ritchie (Fig. 39, vgl. S. 163). Auf der Linie ab befinden sich die Mitten der beiden zu vergleichenden Lichtquellen L_1 und L_2, deren Lichtstärken J_1 und J_2 seien. L_1 beleuchtet eine kleine diffus reflektierende Fläche CP_1 unter dem Einfallswinkel $i_1 = 45^0$; L_2 beleuchtet eine von demselben Stücke herrührende Fläche CP_2 unter dem gleichen Einfallswinkel i_2. Diese von den beiden Lichtquellen beleuchteten Flächen CP_1 und CP_2 werden *Photometerfelder* genannt. CP_1 und CP_2 stoßen in einer Kante C zusammen, welche die Linie ab senkrecht schneidet. In der Linie CO, welche auf ab und der Kante C senkrecht steht, befindet sich das beobachtende Auge O, so daß die Visierlinie CO gleiche Winkel (Ausstrahlungswinkel) ε_1 und ε_2 mit den Normalen auf CP_1 und CP_2 einschließt.

Fig. 39.



Der Beobachter soll auf die Flächen CP_1 und CP_2 sehen und auf gleiche Helligkeit derselben durch Verschieben von L_1 oder L_2 längs der Linie ab einstellen. Die Flächen CP_1 und CP_2 heißen in diesem Falle, wo das Auge auf sie akkommodiert, auch *Vergleichsfelder.*

Bezeichnet nach erfolgter Einstellung r_1 die Entfernung zwischen L_1 und C, ferner r_2 die Entfernung zwischen L_2 und C, so ist

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad \dots\dots\dots \quad 1)$$

d. h. die Lichtstärken verhalten sich wie die Quadrate der Entfernungen der Lichtquellen von den beleuchteten Flächen.

Beweis. Es möge bezeichnen:

E_1 und E_2 die Beleuchtungen von CP_1 und CP_2;

---

[1]) Analog verfährt man bei Benutzung des *Kontrastprinzips*, bei welchem zwei Flächenpaare an Stelle der zwei Flächen treten.

e_1 und e_2 die Flächenhellen von CP_1 und CP_2 in der Sehrichtung CO;
h_1 und h_2 die entsprechenden Helligkeiten;
m_1 und m_2 die entsprechenden Reflexionskoeffizienten [vgl. Gleichung 14) S. 79].

Nun ist nach Gleichungen 7) S. 76 und 8) S. 77

$$h_1 = \varkappa e_1; \quad h_2 = \varkappa e_2,$$

wo $\varkappa$ den Helligkeitskoeffizienten für die beiden gleich weit vom Auge entfernten Flächen CP_1 und CP_2 bezeichnet.

Da durch die photometrische Einstellung

$$h_1 = h_2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

gemacht ist, so ist auch

$$e_1 = e_2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

d. h. *bei der photometrischen Messung wird auf Gleichheit der Flächenhellen der beiden Flächen CP_1 und CP_2 eingestellt.*

Ferner kann man setzen

$$e_1 = m_1 E_1; \quad e_2 = m_2 E_2,$$

so daß

$$m_1 E_1 = m_2 E_2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 4)$$

Da CP_1 und CP_2 aus *demselben* Stücke geschnitten sein sollen, und außerdem $i_1 = i_2$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ist, so ist [nahezu [1])]

$$m_1 = m_2,$$

so daß Gleichung 4) übergeht in

$$E_1 = E_2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 5)$$

B e i d e r a n g e g e b e n e n V e r s u c h s a n o r d n u n g s i n d d i e B e l e u c h t u n g e n a u f CP_1 u n d CP_2 e i n a n d e r g l e i c h.

Nun ist allgemein nach Gleichung 8, S. 75

$$E_1 = \frac{J_1 \cos i_1}{r_1^2}; \quad E_2 = \frac{J_2 \cos i_2}{r_2^2},$$

demnach

$$\frac{J_2 \cos i_2}{r_2^2} = \frac{J_1 \cos i_1}{r_1^2},$$

woraus sich, da $i_1 = i_2$ ist, unmittelbar Gleichung 1) ergibt.

Ist beispielsweise

$$r_1 = 1\,m; \quad r_2 = 3\,m; \quad J_1 = 4\,\text{HK},$$

so ist

$$J_2 = 36\,\text{HK}.$$

---

[1]) Für genaue Messungen muß man die Anordnung $P_1 C P_2$ (das Photometer) *umlegen* (vgl. z. B. S. 166).

Beispiel b). Indirekte Methode (Substitutionsmethode).

Prinzip. Man setzt L_1 und L_2 nacheinander an den Ort von L_2 in Fig. 39; man setzt ferner eine dritte, möglichst konstante Lichtquelle an den Ort von L_1 in Fig. 39 und vergleicht nacheinander L_1 und L_2 mit L_3. L_3 ist hier also eine *Vergleichslampe* (vgl. S. 151).

Ausführung der Messungen. Es werde zunächst L_2 mit L_3 verglichen. Sind r_2 und r_3 die sich nach erfolgter photometrischer Einstellung ergebenden Entfernungen der beiden Lichtquellen vom Photometer, so ist

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_3^2} J_3 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 6)$$

Sodann werde L_1 mit L_3 verglichen; ergeben sich hierbei die Abstände r_1 und r_3', so ist

$$J_1 = \frac{r_1^2}{r_3'^2} J_3 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 7)$$

Demnach ist die Lichtstärke von L_3

$$J_3 = \frac{r_3'^2}{r_1^2} J_1 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

so daß Gleichung 6) übergeht in

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_3^2} \frac{r_3'^2}{r_1^2} J_1 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 9)$$

In beiden Beispielen wurde das Lichtstärkenverhältnis J_2/J_1 bestimmt. Es wurde also L_2 als zu messende Lampe und L_1 als eine Lampe von bekannter Lichtstärke, d. h. entweder als eine Einheitslampe oder als eine *Normallampe* (vgl. S. 152) angesehen.

Die der Fig. 39 zugrunde liegende photometrische Vorrichtung gestattet, das Lichtstärkenverhältnis der beiden Lichtquellen direkt zu bestimmen, welche zu beiden Seiten der Vorrichtung aufgestellt sind. Bei manchen photometrischen Vorrichtungen, z. B. dem Weberschen Milchglasphotometer (§ 87) und dem Brodhunschen Straßenphotometer (§ 101) kann man dieses Verhältnis nicht direkt bestimmen. Alsdann muß man stets das Substitutionsverfahren anwenden, d. h. man muß eine Vergleichslampe L_3 heranziehen, mit welcher man das eine Photometerfeld beleuchtet, während man mit den beiden zu vergleichenden Lichtquellen nacheinander das andere Photometerfeld beleuchtet.

Aus vorstehendem geht folgendes hervor:

Es besteht ein *Photometer* aus zwei Teilen: 1. einer *Vergleichsvorrichtung*, dem eigentlichen Photometer oder Photometeraufsatz, um die Vergleichsfelder dem Auge möglichst günstig darzubieten; 2. einer *Meßvorrichtung* zur meßbaren Schwächung der Helligkeit. Die meßbare Schwächung kann durch verschiedene optische Methoden,

z. B. durch Änderung der Entfernung wie in unseren Beispielen, durch Anwendung von Polarisatoren, bewirkt werden.

Obgleich die Vergleichsvorrichtung der wichtigste Teil eines Photometers ist, wollen wir im folgenden aus praktischen Gründen, z. B. um mehrfache Wiederholungen und Hinweise auf früheres zu vermeiden, die Photometer möglichst nach der Art der Schwächung einteilen.

§ 75. Terminologie.

Im folgenden sollen stets bezeichnen:

allgemein: L_1 *und* L_2 *die beiden zu vergleichenden Lichtquellen,* J_1 *und* J_2 *deren Lichtstärken;*

speziell: L *die zu messende Lichtquelle,* J *deren Lichtstärke;*

L_n *eine Normallampe bzw. Einheitslampe,* J_n *deren Lichtstärke;*

L_a *eine (konstante) Vergleichslampe,* J_a *deren Lichtstärke;*

ferner

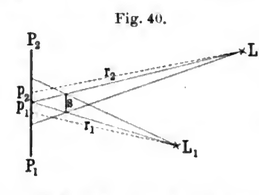
r_1 *den sich bei der photometrischen Einstellung ergebenden Abstand zwischen* L_1 *und dem von* L_1 *beleuchteten Photometerfelde;* r_2, r, r_n, r_a *die entsprechenden Abstände für* L_2, L, L_n, L_a.

B. Anwendung des Entfernungsgesetzes.

§ 76. Das Schattenphotometer von Lambert[1]).

Dieses einfachste, aber auch ungenaueste aller Photometer (Fig. 40) wurde zuerst von Lambert 1760 angegeben[1]) und vielfach von Rumford[2]) benutzt, dem es deshalb oft fälschlich zugeschrieben wird. Die Anordnung ist folgende: Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen L_1 und L_2 werfen auf die weiße Wand $P_1 P_2$ zwei hart aneinanderstoßende Schatten p_2 und p_1 des undurchsichtigen Körpers s (Blechstreifen, Lineal oder Stab). Die Fläche p_1 wird also nur von L_1, die Fläche p_2 nur von L_2 beleuchtet. L_1 oder L_2 wird so lange verschoben, bis die Schatten (die beiden Vergleichsfelder) gleich stark sind. Alsdann ist, wenn die Entfernungen

Fig. 40.



$$L_1 p_1 = r_1; \quad L_2 p_2 = r_2$$

gesetzt werden,

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

[1]) Photometria sive de mensura et gradibus luminis colorum et umbrae 1760.

[2]) Phil. Transact. **84**, 67 (1794); Gilberts Ann. **46**, 230 (1814).

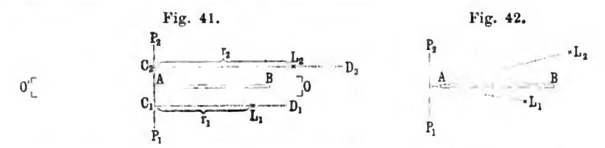
Die Strahlen von L_1 und L_2 müssen stets unter denselben Einfallswinkeln auf p_1 und p_2 auftreffen. Deshalb ist die beweglich aufgestellte Lampe nicht auf einer Geraden, sondern auf einer gewissen Kurve zu verschieben.

Auch bei den folgenden in diesem Abschnitt B. (S. 160 bis 198) zu beschreibenden Photometern gilt, wenn nichts anderes ausdrücklich bemerkt wird, die eben angegebene Gleichung 1).

§ 77. Photometer von Bouguer und Foucault.

Das Bouguersche Photometer [1]) ist das älteste Photometer. Die weiße vertikale Wand $P_1 P_2$ (Fig. 41) wird durch die geschwärzte Scheidewand AB in zwei Teile $P_1 A$ und AP_2 geteilt. $P_1 A$ wird durch L_1, AP_2 durch L_2 aus hinreichend großer Entfernung gleichmäßig beleuchtet. Es wird entweder L_1 längs des Maßstabes $C_1 D_1$ oder L_2 längs des Maßstabes $C_2 D_2$ so lange verschoben, bis die beiden Vergleichsfelder $P_1 A$ und AP_2 dem in der Verlängerung von AB befindlichen Auge O gleich hell erscheinen.

Fig. 41. Fig. 42.



Nach Potter [2]) ersetzt man die weiße Wand $P_1 P_2$ durch eine diffus durchscheinende Substanz (mattgeschliffene Glasscheibe oder durchscheinendes Papier) und beobachtet von der Rückseite aus der Stellung O'.

Ein Übelstand dieser Anordnung ist, daß die beiden Vergleichsfelder $P_1 A$ und AP_2 durch eine von der Scheidewand AB herrührende dunkle Zone getrennt werden. Foucault sucht (Fig. 42) diesen Übelstand dadurch zu beseitigen, daß er die Scheidewand AB so weit vom Schirme $P_1 P_2$ entfernt, bis die von den Mitten der beiden Lichtquellen nach A gezogenen Linien $L_1 A$ und $L_2 A$ sich gerade vor $P_1 P_2$ schneiden. Hierdurch wird wegen der räumlichen Ausdehnung der Lichtquellen jedoch nur erreicht, daß die beiden Felder allmählich ineinander übergehen, d. h., daß an Stelle der dunklen Zone eine andere tritt, welche gleichzeitig von beiden Lichtquellen beleuchtet wird. Als diffus durchscheinenden Schirm verwendet Foucault eine

[1]) Essai d'optique. Paris 1729; traité d'optique sur la gradation de la lumière. Ouvrage posthume, publié par l'Abbé de Lacaille. Paris 1760.

[2]) Edinburgh Journal of Science (2) 3, 284 (1830).

zwischen zwei Glasplatten eingeschlossene gleichförmige Schicht aus Amidam (Getreidestärkemehl).

§ 78. Das Photometer der Gas Referees.

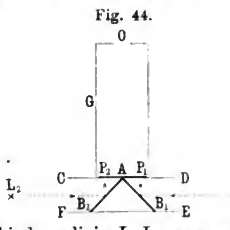
Ein vertikaler durchscheinender Schirm $P_1 P_2$ (Fig. 43) ist am Ende eines horizontalen Rohres befestigt. In diesem Rohre ist ein anderes verschiebbar, welches ein Diaphragma mit der rechteckigen Öffnung AB hat. L_1 und L_2 beleuchten $P_1 P_2$ durch AB hindurch unter gleichen Einfallswinkeln an den rechteckigen Stellen p_1 und p_2. Die Blende wird so lange verschoben, bis p_1 und p_2 ineinander übergehen. Die photometrische Einstellung erfolgt durch Verschieben der einen Lichtquelle (Argandbrenner) oder durch Änderung ihres Konsums. Das Photometer wird jetzt auf Veranlassung der Gas Referees zu London[1]) von den englischen Gasprüfungsämtern angewandt (vgl. § 157).

Fig. 43.

§ 79. Das Photometer von Ritchie[2]).

Zwischen L_1 und L_2 (Fig. 44) befinden sich zwei gegen die Verbindungslinie $L_1 L_2$ unter 45° geneigte und aus demselben Stücke geschnittene Spiegel AB_1 und AB_2, die sich in der Kante A schneiden. Die Spiegel werfen das Licht von L_1 und L_2 senkrecht auf die Mattglasscheibe $P_1 P_2$, so daß $P_1 A$ (das eine Vergleichsfeld) von L_1, AP_2 (das andere Vergleichsfeld) von L_2 beleuchtet wird. Die beiden Spiegel sowie das Mattglas sind in einem innen geschwärzten, an beiden Enden offenen Kasten $CDEF$, dem *Photometergehäuse*, angebracht, dessen Achse mit der Verbindungslinie $L_1 L_2$ zusammenfällt. Das Gehäuse trägt ein Rohr G mit einer Öffnung (Okularloch) O. Der Beobachter blickt durch diese Öffnung auf die beiden Vergleichsfelder. Hier ist r_1 die Entfernung von L_1 nach der Mitte von AB_1 und von da nach dem Mattglase, oder, was dasselbe ist, die Entfernung von dem Spiegelbilde von L_1 bis zum Mattglase; entsprechendes gilt für r_2.

Fig. 44.



Dieses Photometer ist also im Grunde genommen ebenfalls nur eine Modifikation des Photometers von Bouguer, aus welchem es hervor-

[1]) Vgl. J. f. G. u. W. **41**, 654, 1898.

[2]) Annals of Philosophy (3) **1**, 174.

geht, wenn man die Scheidewand AB (Fig. 41) durch die beiden unter 45^0 gegen $P_1 P_2$ geneigten Spiegel ersetzt. Die Anordnung von Ritchie bezeichnet einen wesentlichen Fortschritt gegenüber den bisher beschriebenen; denn sie gestattet die Anwendung *einer geraden Photometerbank* (s. § 138), auf welcher sich die drei in Betracht kommenden Teile, nämlich die zu vergleichenden Lichtquellen L_1 und L_2, sowie das Photometergehäuse beweglich aufstellen lassen. Ist diese Bank mit einer Längenteilung versehen, so kann man also den Abstand dieser drei Teile voneinander direkt messen.

Bei Benutzung einer geraden Photometerbank ergeben sich die folgenden *drei Versuchsanordnungen*, von denen jede nach der Natur von L_1 und L_2 ihre technischen Vorzüge und Mängel besitzt.

Versuchsanordnung 1. L_1 und L_2 stehen fest, während der Photometerschirm verschoben wird.

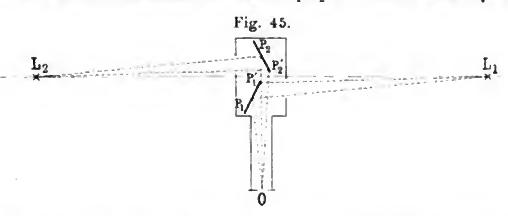
Versuchsanordnung 2. Der Schirm und eine der Lichtquellen sind fest verbunden und werden gleichzeitig verschoben; die andere steht fest.

Versuchsanordnung 3. Die eine Lichtquelle und der Schirm sind fest aufgestellt; die andere Lichtquelle wird verschoben.

§ 80. Photometer mit keilförmiger Anordnung der Photometerfelder.

a) Modifikation des eben beschriebenen Photometers. Läßt man die durchscheinende Platte $P_1 P_2$ fort und ersetzt die beiden

Fig. 45.



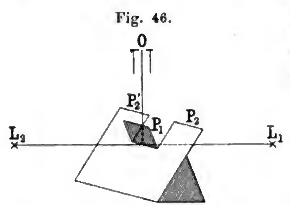
Spiegel AB_1 und AB_2 durch zwei möglichst gleiche weiße Flächen, so erhält man das weit einfachere, bereits auf S. 157 beschriebene keilförmige Photometer, welches nach Palaz von Villarceau, nach den übrigen Autoren ebenfalls von Ritchie herrührt.

Nach Einstellung auf gleiche Helligkeit der Vergleichsfelder CP_1 und CP_2 (Fig. 39) erscheint der keilförmige Photometerschirm $P_1 CP_2$ als eine gleichförmig beleuchtete Fläche, welche durch die unscharfe dunkle Kante C in zwei Teile getrennt ist.

Eine schärfere Trennungslinie der beiden Vergleichsfelder wird durch die beiden folgenden Photometer erzielt.

b) Photometer von Conroy[1]). Die Kartons $P_1 P_1'$ und $P_2 P_2'$ (Fig. 45 a. v. S.) werden von je einer der beiden Lichtquellen L_1 und L_2 unter Einfallswinkeln $i = 30^0$ beleuchtet. Nach Conroy tritt dann keine regelmäßige Reflexion ein, während dies bei $i = 45^0$ der Fall sein soll. $P_1 P_1'$ ist bei P_1', mit einer scharfen Kante versehen. Das Auge bei O sieht $P_1 P_1'$ auf $P_2 P_2'$ projiziert und erhält den Eindruck, als ob die beiden Vergleichsfelder in der Kante P_1' zusammenstoßen.

Fig. 46.

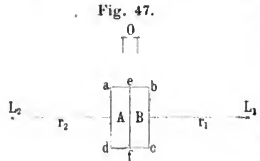


c) Im Photometer von Thompson[2]) sind die beiden Seitenflächen eines Prismas von 70⁰ in der aus Fig. 46 ersichtlichen Weise mit weißem Karton bedeckt; die Zungen P_2 und P_2' werden von L_2, die Zunge P_1 wird von L_1 beleuchtet. Das Auge O befindet sich in der Winkelhalbierungsebene der beiden Seitenflächen.

§ 81. Diffusionsphotometer von Joly-Elster.

Zwei Klötze A und B (Fig. 47), welche aus Paraffin, Stearin, Wachs oder besser noch zur Erzielung einer größeren Dauerhaftigkeit aus diffusem Glasfluß (Alabasterglas) hergestellt sind, werden, durch ein Staniolblättchen ef getrennt, aufeinander gelegt. L_1 und L_2 beleuchten die Seitenflächen bc und ad senkrecht. Das eindringende Licht wird nach allen Seiten zerstreut. Das Auge befindet sich in der Verlängerung von ef, blickt also senkrecht auf die Vorderfläche ab. Wenn es die beiden Vergleichsfelder ae und eb, welche durch eine dünne schwarze Linie getrennt sind, gleich hell sieht, werden bc und ad als gleich stark beleuchtet angesehen. In diesem Falle ist $r_1 + r_2$ gleich dem Abstande der beiden Lichtquellen, vermindert um die Dicke des Photometerkörpers.

Fig. 47.



Der Photometerkörper absorbiert das Licht stark, so daß man es im allgemeinen mit nur geringer Helligkeit zu tun hat.

Das Photometer wurde fast gleichzeitig von Joly[3]) und Elster[4]) beschrieben.

---

[1]) Proc. Roy. Soc. 35, 28 (1883); Phil. Mag. 15, 425 (1883).
[2]) Phil. Mag. (5) 36, 120 (1893).
[3]) Ebenda (5) 26, 26 (1888).
[4]) Z. f. Instrk. 8, 299 (1888).

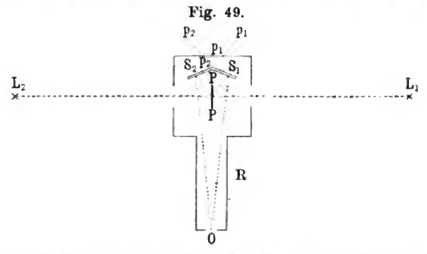
§ 82. Das Bunsensche Photometer.

a) Prinzip und Beschreibung desselben.

Das Photometer beruht darauf, daß ungefettetes Papier mehr Licht reflektiert, aber weniger durchläßt als gefettetes. In seiner einfachsten Gestalt (Fig. 48) besteht es aus einem weißen Papierschirm PP, der in seiner Mitte mit einem Fettfleck pp versehen ist und auf einer geraden optischen Bank senkrecht zur Bankachse $L_1 L_2$ so aufgestellt ist, daß die Mitte des Fettfleckes in dieser Achse liegt. Bringen wir den Schirm in die Nähe von L_1, so sieht ein (wie in der Fig. 48 angedeutet) von links auf ihn blickender Beobachter das gefettete Papier, das eine Vergleichsfeld, als einen hellen Fleck inmitten des ungefetteten Papieres, des zweiten Vergleichsfeldes. Bringt man den Schirm in die Nähe von L_2, so sieht der wieder von links blickende Beobachter umgekehrt den Fettfleck dunkel auf hellem

Fig. 48.

Fig. 49.

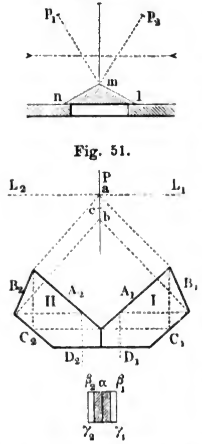


Grunde. Bei einer gewissen Stellung zwischen L_1 und L_2 sieht er dann die ganze linke Schirmseite als eine gleichmäßig leuchtende Fläche, d. h. *der Fettfleck ist verschwunden.* Ebenso verschwindet der Fettfleck bei der Betrachtung von rechts her an einer im allgemeinen anderen Stelle der Photometerbank. Das Verschwinden des Fettfleckes hängt jedoch stark vom Winkel ab, unter welchem man auf den Schirm sieht.

Um gleichzeitig beide Seiten des Schirmes übersehen zu können und außerdem eine feste Visierrichtung zu erhalten, hat Rüdorff zwei Spiegel S_1 und S_2 (Fig. 49), welche je einen Winkel von etwa 70^0 mit der Ebene des Papierschirmes bilden, mit dem den Schirm tragenden Stativ fest verbunden und an dem letzteren das Beobachtungsrohr R mit der Öffnung O angebracht. Das durch O blickende Auge sieht dann die Bilder $p_1 p_1$ und $p_2 p_2$ der beiden Seiten des Schirmes PP in einem spitzen Winkel zueinander stehend; allein die Bilder erscheinen durch einen größeren dunklen Zwischenraum voneinander getrennt. Zur

Vermeidung dieses Übelstandes bringt v. Hefner-Alteneck[1]) zwischen Schirm und Auge das Prisma *nml* (Fig. 50) an, durch welches man die beiden Bilder p_1 und p_2 dicht nebeneinanderstehend erblickt.

Krüss[2]) bedient sich zweier Reflexionsprismen I und II (Fig. 51), deren gemeinsame Berührungsfläche in der Verlängerung der Ebene des Papierschirmes P liegt. Ein senkrecht auf D_1 und D_2 blickendes Auge sieht dann die Bilder der beiden Seiten des Schirmstückes ab in einer feinen Linie α aneinanderstoßen, und zwar ergibt sich, wenn der Schirm von a bis c gefettet, von c bis b nicht gefettet ist, das in der Figur angegebene Gesichtsfeld, in welchem die schraffiert gezeichneten Teile $\alpha\gamma_1$ und $\alpha\gamma_2$ die Bilder der rechten und linken Seite des Fettfleckes, und die nicht schraffiert gezeichneten Teile $\gamma_1\beta_1$ und $\gamma_2\beta_2$ die Bilder der beiden Seiten des nicht gefetteten Papieres bezeichnen. Verschiebt man den Papierschirm so weit nach der anderen Seite, daß der Fettfleck außerhalb des wirksamen Raumes ab liegt, so wirkt der Apparat ähnlich wie ein Foucaultsches Photometer.



Bei Benutzung der Spiegel oder der Prismenapparate findet man außer den Stellungen I und II, wo das Bild der linken bzw. rechten Seite des Fettfleckes verschwindet, noch eine dritte Stellung III, wo die Bilder der linken und rechten Seite des Fettfleckes gleich stark gegen ihre Umgebung kontrastieren.

Um die durch das ungleiche Verhalten der beiden Schirmseiten veranlaßten Fehler zu eliminieren, kann man bei den neueren Modellen das ganze Photometergehäuse *umlegen*, d. h. um eine in der Ebene des Papieres liegende und durch die Mitte des Fettfleckes gehende horizontale Achse um 180° drehen, so daß diejenige Seite des Schirmes, welche vorher der Lichtquelle L_1 zugewandt war, nunmehr auf der Seite der Lichtquelle L_2 liegt.

Herstellung des Schirmes. Man bedeckt die Oberfläche eines Petschaftes oder dergleichen mit Stearin oder Paraffin, erhitzt dasselbe und drückt es leicht auf das Papier. Darauf schabt man von dem so entstandenen Fettflecke alles überflüssige Stearin oder Paraffin ab und erwärmt das Ganze noch einmal. Töpler legt drei Papierblätter aufeinander, von denen das mittlere mit einem kreisförmigen Loche ver-

[1]) E. T. Z. 4, 445 (1883).
[2]) J. f. G. u. W. 27, 587 (1884).

sehen ist. Man kann auch die äußeren von drei Papierblättern an zwei gegenüberliegenden Stellen mit gleich großen Ausschnitten versehen oder ein Papierblatt mit einem anderen teilweise bekleben usw. In England gibt man nach Dibdin dem mittleren Felde gewöhnlich die Gestalt eines Sternes (star disc).

b) Ausführung der Messungen [1]).

Methode 1. (Substitutionsverfahren von Bunsen.)

Eine konstante Vergleichslichtquelle L_a wird auf die eine Seite des Schirmes in der festen Entfernung r_a von demselben angebracht. Auf die andere Seite des Schirmes setzt man nacheinander L_2 und L_1 und mißt die Entfernungen r_2 und r_1, bei welchen der Fettfleck auf derselben Seite verschwindet. Alsdann wird J_2 wieder mittels Gleichung 1), S. 160 gefunden. Denn in beiden Fällen erzeugen L_1 und L_2 auf dem Schirme die gleiche Beleuchtung.

Methode 2.

Man setzt L_2 auf die eine Seite [2]), L_1 auf die andere Seite des Schirmes und stellt nacheinander auf Verschwinden des Fettfleckes links und rechts ein. Sind die hierbei gefundenen Entfernungen das erste Mal r_2, r_1, das andere Mal r'_2, r'_1, so wird

$$J_2 = \frac{r_2\, r'_2}{r_1\, r'_1} \cdot J_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

falls sich die beiden Schirmseiten gleich verhalten.

Ist das letztere nicht der Fall, so dreht man das Photometergehäuse (ev. nur den Schirm) um 180° und wiederholt die beiden Einstellungen, wobei r''_2, r''_1 und r'''_2, r'''_1 gefunden werden mögen. Dann ist

$$J_2 = \sqrt[4]{\frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot \frac{r_2'^2}{r_1'^2} \cdot \frac{r_2''^2}{r_1''^2} \cdot \frac{r_2'''^2}{r_1'''^2}} \cdot J_1 \quad \ldots\ldots \quad 1\,a)$$

Beweis. Es möge bezeichnen:

e, m, t für die linke Seite des ungefetteten Papiers: Flächenhelle, Reflexions- und Durchlässigkeitskoeffizient;

e', m', t' die entsprechenden Größen für die linke Seite des Fettfleckes;

e_1, m_1, t_1; e'_1, m'_1, t'_1 die sich auf die rechte Seite des ungefetteten und gefetteten Papieres beziehenden Größen.

Alsdann ist

$$\left.\begin{aligned} e &= \frac{J_2 m}{r_2^2} + \frac{J_1 t}{r_1^2}; \quad e' = \frac{J_2 m'}{r_2^2} + \frac{J_1 t'}{r_1^2}; \\ e_1 &= \frac{J_2 t_1}{r_2^2} + \frac{J_1 m_1}{r_1^2}; \quad e'_1 = \frac{J_2 t'_1}{r_2^2} + \frac{J_1 m'_1}{r_1^2}. \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 2)$$

[1]) Eine vollständige Theorie des Bunsenschen Photometers gibt L. Weber, Wied. Ann. 31, 676 (1887).

[2]) Im folgenden soll stets die linke Seite angenommen werden.

Beim Einstellen auf Verschwinden des Fettfleckes links wird $e = e'$, demnach nach Gleichung 2)

$$J_2 = \frac{t' - t}{m - m'} \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot J_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Ebenso wird beim Einstellen auf Verschwinden rechts $e_1 = e_1'$, demnach, wenn wir r_2 und r_1 durch r_2' und r_1' ersetzen,

$$J_2 = \frac{m_1 - m_1'}{t_1' - t_1} \cdot \frac{r_2'^2}{r_1'^2} \cdot J_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Durch Multiplikation der Gleichungen 3) und 4) folgt Gleichung 1), falls sich beide Schirmseiten gleich verhalten, also $m = m_1$; $t = t_1$; $m' = m_1'$; $t' = t_1'$ ist.

Im Falle der Ungleichseitigkeit treten zu den Gleichungen 3) und 4) zwei neue hinzu, die man erhält, wenn man in Gleichung 3) r_2 und r_1 durch r_2'' und r_1'' ersetzt und zu den m und t den Index 1 hinzufügt, ferner in Gleichung 4) r_2' und r_1' durch r_2''' und r_1''' ersetzt und bei den m und t den Index 1 fortläßt. Durch Multiplikation aller vier Gleichungen folgt Gleichung 1 a).

Methode 3.

Man stellt L_2 und L_1 wie in Methode 2 auf und sucht diejenigen Entfernungen r_2 und r_1, bei welchen die Fettfleckbilder gleich stark gegen ihre Umgebung kontrastieren. Falls sich die beiden Schirmseiten gleich verhalten, berechnet sich J_2 mittels der Gleichung 1) (S. 160). Andernfalls dreht man das Photometergehäuse (ev. nur den Schirm) wieder um 180° und macht die neue Einstellung r_2', r_1'. Dann ist

$$J_2 = \frac{r_2\, r_2'}{r_1\, r_1'} \cdot J_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

Beweis. Es wird hier so eingestellt, daß

$$\frac{e'}{e} = \frac{e_1'}{e_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

wird. Setzt man

$$\frac{r_2^2}{r_1^2} = p,$$

so ist nach Gleichung 2)

$$\frac{e'}{e} = \frac{J_2\, m' + J_1\, t'\, p}{J_2\, m + J_1\, t\, p}; \quad \frac{e_1'}{e_1} = \frac{J_1\, m_1'\, p + J_2\, t_1'}{J_1\, m_1\, p + J_2\, t_1} \quad \ldots \quad 7)$$

Mithin ist nach Gleichung 6), wenn zur Abkürzung

$$p_1 = m'\, t_1 - m\, t_1'; \quad p_2 = m_1\, t' - m_1'\, t$$
$$p_3 = t_1\, t' + m_1\, m'; \quad p_4 = t\, t_1' + m\, m_1'$$

gesetzt wird,

$$J_2^2\, p_1 + J_1\, J_2\, p\, (p_3 - p_4) + J_1^2\, p^2\, p_2 = 0 \quad \ldots\ldots \quad 8)$$

Falls beide Schirmseiten gleich beschaffen sind, ist $p_3 = p_4$ und $p_1 = -p_2$, und man erhält die gewöhnliche Gleichung.

Im allgemeinen Falle der Ungleichseitigkeit tritt zu Gleichung 8) noch die Gleichung

$$J_2^2 p_2 + J_1 J_2 p' (p_3 - p_4) + J_1^2 p'^2 p_1 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

in welcher gesetzt ist

$$p' = r_2'^2 / r_1'^2.$$

Multiplizieren wir Gleichung 8) mit p' und Gleichung 9) mit p und subtrahieren die letztere Gleichung von der ersteren, so ergibt sich Gleichung 5).

c) Genauigkeit einer einzelnen Einstellung.

Das Photometer von Bunsen hat vor den vorher beschriebenen den großen Vorzug, daß bei ihm die Bedingungen für die günstigste Ausnutzung der Unterschiedsempfindlichkeit erfüllt sind; denn falls die Ränder nicht verwaschen sind, gehen die beiden Felder im Falle gleicher Helligkeit scharf ineinander über, während dieselben bei den anderen Photometern entweder durch einen größeren oder kleineren, meist dunklen Zwischenraum getrennt sind oder allmählich ineinander übergehen. Aber das Bunsensche Photometer hat den bedeutenden Übelstand, daß jedes der zu vergleichenden Felder nicht von einer, sondern gleichzeitig von beiden Lichtquellen beleuchtet wird.

Durch diese Vermischung (Kompensation, § 104) des von den beiden Lichtquellen kommenden Lichtes wird die Empfindlichkeit der Einstellung bedeutend beeinträchtigt, wie in der bereits zitierten Abhandlung von Weber zuerst gezeigt ist. Im folgenden soll dies in elementarer Weise für den einfachen Fall nachgewiesen werden, daß nach der Bunsenschen Substitutionsmethode gemessen wird.

L_2 und L_1 mögen hierbei nacheinander auf die linke Seite der Photometerbank aufgestellt werden, während sich L_a in der festen Entfernung r_a vom Photometerschirm befindet, und es möge der Beobachter immer von links her auf den Schirm blicken. Wir wollen von der Stellung I ausgehen, in welcher die beiden Vergleichsfelder bei der Messung von L_2 die gleiche Flächenhelle $e = e'$ besitzen; alsdann sei r_2 der Abstand zwischen L_2 und Schirm. Verschieben wir das Photometer aus dieser Stellung nach rechts, so nimmt die Flächenhelle des Fettfleckes langsamer als die des ungefetteten Papieres ab. Bei einer gewissen Stellung I′ des Photometerschirmes, die sich in der Entfernung ζ_2 von Stellung I, also in der Entfernung $r_2 + \zeta_2$ von L_2 befindet, besitzt der Fettfleck eine um den gewissen Bruchteil ψ größere Flächenhelle als seine Umgebung. Ist ψ gleich der relativen Unterschiedsschwelle (S. 155), so wird der Fettfleck gerade hell auf dunklem Grunde hervortreten. Ebenso gibt es links von der Stellung I ebenfalls in der Entfernung ζ_2 eine Stellung I″, in welcher der Fettfleck

gerade dunkel auf hellem Grunde hervortritt. Auf der Strecke $2\zeta_2$ zwischen den Stellungen I' und I'' werden also die beiden Vergleichsfelder dem Auge gleich hell erscheinen. Die Unsicherheit einer Einstellung ist demnach um so größer, je größer ζ_2 ist.

Es ergibt sich

$$\zeta_2 = \tfrac{1}{2} r_2 C \psi \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 10)$$

wenn gesetzt wird

$$C = \frac{m'}{m - m'} + \frac{t'}{t' - t} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11)$$

Beweis. In Stellung I ist $e' = e$, demnach nach Gleichung 2)

$$1 = \left(\frac{m' J_2}{r_2^2} + \frac{t' J_a}{r_a^2}\right) : \left(\frac{m J_2}{r_2^2} + \frac{t J_a}{r_a^2}\right).$$

Hieraus folgt

$$m J_2 r_a^2 + t J_a r_2^2 = m' J_2 r_a^2 + t' J_a r_2^2 \quad \ldots \quad 12)$$

$$J_2 = \frac{t' - t}{m - m'} \cdot \frac{r_2^2}{r_a^2} \cdot J_a \quad \ldots \ldots \ldots \quad 13)$$

In Stellung I' ist $(1 + \psi) = e'/e$, so daß

$$1 + \psi = \left(\frac{m' J_2}{R_2^2} + \frac{t' J_a}{r_a^2}\right) : \left(\frac{m J_2}{R_2^2} + \frac{t J_a}{r_a^2}\right),$$

wo

$$R_2 = r_2 + \zeta_2$$

ist. Mithin wird

$$(1 + \psi)(m J_2 r_a^2 + t J_a R_2^2) = m' J_2 r_a^2 + t' J_a R_2^2.$$

Subtrahiert man hiervon Gleichung 12), so wird

$$\psi (m J_2 r_a^2 + t J_a R_2^2) = (t' - t)(R_2^2 - r_2^2) J_a \quad \ldots \quad 14)$$

Wegen der Kleinheit von ζ_2 im Vergleich zu r_2 ist

$$R_2^2 = r_2^2 + 2 r_2 \zeta_2, \quad \text{also } R_2^2 - r_2^2 = 2 r_2 \zeta_2.$$

Setzt man dies in Gleichung 14) ein, so ergibt sich

$$\psi (m J_2 r_a^2 + t J_a r_2^2) = 2 (t' - t - t\psi) r_2 \zeta_2 J_a.$$

Substituieren wir hierin J_2 aus Gleichung 13), so wird

$$\frac{m t' - m' t}{m - m'} r_2^2 \psi = 2 (t' - t - t\psi) r_2 \zeta_2 \quad \ldots \ldots \quad 15)$$

Da die Größe $t\psi$ gegen $(t' - t)$ relativ klein ist, können wir sie auf der rechten Seite von Gleichung 15) vernachlässigen. Lösen wir die letztere nach ζ_2 auf, so erhalten wir Gleichung 10), weil der Koeffizient von $\frac{1}{2} r_2 \psi$ gleich C ist.

Bei der Messung von L_1 sei r_1 der wahre Abstand, in welchem die beiden Vergleichsfelder genau die gleiche Flächenhelle besitzen. Alsdann wird der wahre Wert von J_2 gefunden durch

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot J_1.$$

Setzt man in diese Gleichung statt des wahren Wertes r_2 den gefundenen Wert $r_2 + \zeta_2$ ein, so ist der prozentuelle Fehler $\mathfrak{F}$, welchen man hierdurch in der Bestimmung von J_2 macht, nach Gleichung 25) Anhang 1

$$\mathfrak{F} = 200 \frac{\zeta_2}{r_2} = 100\, C\, \psi \text{ [1]} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

Bei der Einstellung auf Verschwinden der rechten Seite des Fettfleckes ergibt sich

$$\mathfrak{F}' = 100\, C'\, \psi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 17)$$

wo

$$C' = -\left(\frac{t_1'}{t_1' - t_1} + \frac{m_1'}{m_1 - m_1'}\right).$$

Die Fehler $\mathfrak{F}$ und $\mathfrak{F}'$, welche man infolge einer ungenauen Einstellung r_2 macht, sind also proportional:

1. den nur durch die Beschaffenheit des Schirmes bedingten Größen C und C', welche Weber deshalb die *Empfindlichkeitskoeffizienten* des Schirmes nennt;

2. der durch die psycho-physiologischen Fähigkeiten des Auges bedingten relativen Unterschiedsschwelle ψ.

$\mathfrak{F}$ und $\mathfrak{F}'$ werden also um so kleiner, je kleiner C und C' werden. Die absoluten Werte von C und C' können niemals kleiner als 1 werden. Der Wert 1 wird erreicht, wenn $t = m' = t_1 = m_1' = 0$ ist, d. h. wenn das nicht gefettete Papier nur Licht reflektiert und der Fettfleck nur Licht hindurchläßt.

Beispiel. Es sei $\psi = 0{,}01$, und ferner in einer beliebigen Einheit

$$m = 14{,}0;\ t = 3{,}5;\ m' = 5{,}9;\ t' = 11{,}5;$$

dann wird nach Gleichungen 11) und 16)

$$C = 2{,}2; \quad \mathfrak{F} = 2{,}2 \text{ Proz.}$$

Die Unsicherheit der Einstellung auf Verschwinden des Fettfleckes links veranlaßt hier also einen Fehler von 2,2 Proz.

Hat man dagegen einen Schirm, für welchen

$$t = m' = 0,$$

so wird

$$C = 1; \quad \mathfrak{F} = 1 \text{ Proz.}$$

Im ersteren Falle ist also der Fehler 2,2 mal so groß als im zweiten.

Bei den vorher beschriebenen Photometern ist allerdings auch

$$\mathfrak{F} = 100\, \psi;$$

allein dies ψ hat einen größeren Wert als beim Bunsenschen Photometer, weil die Felder nicht in scharfer Kante aneinanderstoßen.

---

[1]) Der bei Messung von L_1 zu erwartende Fehler ist ebenfalls der absoluten Größe nach gleich $100\, C\psi$. Demnach ist bei der Bestimmung von J_2 der zu erwartende mittlere Gesamtfehler

$$\mathfrak{F}_m = \pm 100\, C\, \psi \sqrt{2}.$$

Nun hat Weber für C und C' Werte gefunden, die zwischen 2 und 4 liegen. Daraus folgt, daß bei den gebräuchlichen Bunsenschirmen die Empfindlichkeit auf $^1/_2$ bis $^1/_4$ der möglichen herabgemindert wird.

Auf Grund der Weberschen Untersuchungen haben Lummer und Brodhun [1]) für ein Photometer die folgenden theoretischen Bedingungen 1. bis 3. aufgestellt, zu denen sie noch die praktischen Bedingungen 4. und 5. hinzufügten:

1. *Jedes der zu vergleichenden Felder darf nur von einer Lichtquelle beleuchtet sein.*
2. *Die Grenze, in der die Felder zusammenstoßen, muß möglichst scharf sein.*
3. *im Momente der Gleichheit vollständig verschwinden.*
4. *Die Vorrichtung soll möglichst unveränderlich sein.*
5. *Die Vertauschung der beiden Seiten der Vorrichtung soll die Einstellung nicht (oder doch nur wenig) ändern.*

Diese fünf Bedingungen sind bei den beiden jetzt zu beschreibenden Photometern von Lummer und Brodhun erfüllt.

§ 83. Gleichheitsphotometer von Lummer und Brodhun [2]).

a) Prinzip des Photometers.

Der wesentlichste Teil des Photometers ist der *Photometerwürfel* [3]). Lummer und Brodhun haben fünf verschiedene Formen desselben angegeben, von denen die gebräuchlichste in Figur 52 dargestellt ist. Die kugelförmige Hypotenusenfläche des Prismas A ist bei rs eben angeschliffen und an die gleichfalls ebene Hypotenusenfläche ab des Prismas B so innig angepreßt, daß alle Luft an der Berührungsstelle entfernt ist. l und λ bezeichnen zwei diffus leuchtende Flächen. Das von l auf die Kathetenfläche dp des Prismas A fallende und nach rs weiter-

---

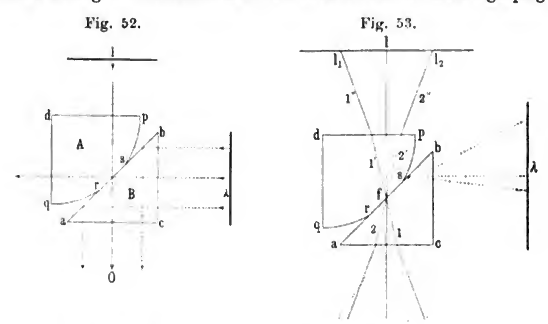
[1]) Z. f. Instrk. 9, 41 (1899).

[2]) Ebenda 9, 23 (1899); 9, 41 (1889); 12, 41 (1892).

[3]) Im Phil. Mag. (5) 49, 118 (1900) behauptete Knott, daß dieser Würfel eine Wiedererfindung einer bereits 1859 von Swan benutzten Prismenkombination sei. Demgegenüber weisen Lummer und Brodhun im Phil. Mag. (5) 49, 541 (1900) darauf hin, daß sie in ihrer ersten Veröffentlichung die Bedingungen für die größtmögliche Empfindlichkeit des Gleichheitsphotometers aufgestellt und nur jenen Photometerwürfel (Fig. 52) beschrieben hätten, welcher den theoretischen Anforderungen an einen „idealen Fettfleck" genügt. In ihrer zweiten Veröffentlichung hätten sie sodann die Vorzüge und Nachteile der fünf möglichen Kombinationen diskutiert. Hierbei sei auch eine Form erwähnt, welche dem Swanschen Würfel entspreche, bei welchem die beiden Prismen in ihrer Berührungsfläche verkittet sind. Da aber die Kittsubstanz mehrere Mängel im Gefolge habe, so hätten sie diese Swansche Form des Würfels als die unvollkommenste ebensowenig wie einige der anderen Formen empfohlen, welche der Swanschen vielleicht überlegen sind. Das ferner von ihnen konstruierte Kontrastphotometer unterscheide sich noch vielmehr von dem Swanschen Photometer.

gehende Licht geht ungebrochen und ungeschwächt in das Prisma *B* über und tritt durch die Kathetenfläche *ac* parallel zur ursprünglichen Richtung aus. Ebenso geht das von *λ* auf die Kathetenfläche *bc* des Prismas *B* fallende Licht an den Stellen *rs* durch den Prismenwürfel hindurch; dagegen wird das auf *bc* senkrecht oder nahezu senkrecht auffallende Licht an den Stellen *ar* und *sb* total reflektiert. In der Figur ist der Strahlengang für senkrecht auf die Kathetenflächen *dp* und *bc* auffallende Strahlen angegeben. Mithin sieht das auf die Fläche *l* akkommodierende Auge *O* die letztere bei *rs* durch den Würfel hindurch wie durch eine gewöhnliche dicke planparallele Glasplatte. Dagegen sieht es die Fläche *λ* an den Stellen *ar* und *sb* wie mittels eines gewöhnlichen totalreflektierenden Prismas gespiegelt.

Fig. 52. Fig. 53.



Bei den bisher beschriebenen Photometern sah das Auge auf die von den beiden Lichtquellen beleuchteten Flächen, d. h. *es waren die Photometerfelder zugleich die Vergleichsfelder.* Im vorliegenden Falle sind die von irgendwo her beleuchteten, diffus leuchtenden Flächen *l* und *λ* die Photometerfelder. Allein es ist nicht ratsam, auf dieselben zu blicken, weil alsdann die Fläche *rs* einen Zerstreuungskreis im Auge erzeugt. Vielmehr empfiehlt es sich aus den unten angegebenen Gründen, auf die Hypotenusenfläche *ab* zu akkommodieren.

Von jedem Punkte *f* der gemeinsamen Berührungsfläche *rs* (Fig. 53 [1]) geht ein begrenzter Strahlenkegel aus, dessen einzelne Strahlen von verschiedenen Punkten der Fläche *l* herrühren; z. B. kommen die Strahlen 1, 2 ... von den Punkten l_1, l_2 ... Mithin verhält sich *rs* wie eine von *l* beleuchtete, diffus durchlassende Fläche, welche, abgesehen von den Verlusten durch Reflexion und Absorption in der Glasmasse, im Punkte *f* und in der beliebigen Richtung 1 mit der Flächenhelle leuchtet, welche *l* in dem Punkte l_1 in der Richtung 1″ besitzt; mit

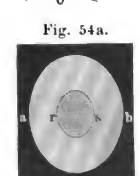
[1]) Der Strahlengang ist (übertrieben) für einfarbiges Licht gezeichnet.

anderen Worten: *rs* ist eine der Fläche *l äquivalente Leuchtfläche* (vgl. Anhang 4 a). Entsprechend verhält sich die Hypotenusenfläche *ab* an den Stellen *ar* und *sb* wie eine von λ beleuchtete, diffus reflektierende und λ *äquivalente Leuchtfläche.* Es seien nun speziell *l* und λ solche diffus leuchtenden Flächen, welche in allen Elementen in den hier in Betracht kommenden Richtungen die gleiche Flächenhelle besitzen. Es möge ferner ein in der Mittelsenkrechten von *ac* bei *O* befindliches Auge (Fig. 54) auf die Hypotenusenfläche *ab* scharf akkommodieren. Dann wird der von jedem Punkte von *ab* ausgehende Strahlenkegel die ganze Pupille des hinreichend weit von *ac* entfernten Auges ausfüllen, und man sieht, von den Reflexions- und Absorptionsverlusten abgesehen, die Fläche *rs* in der Helligkeit von *l*, dagegen die Fläche *ab* an den Stellen *ar* und *sb* in der Helligkeit von λ leuchten.

Fig. 54.

Es erscheint so die Fläche *rs* *(das eine Vergleichsfeld)* als ein gleichmäßig heller oder dunkler Fleck (der Ersatz für den Bunsenfleck), in einem gleichförmig leuchtenden ringförmigen Felde *(dem zweiten Vergleichsfelde).* Fig. 54 a zeigt das sich ergebende Gesichtsfeld. Dem äußeren Felde ist dadurch eine ringförmige Gestalt gegeben, daß man den Rand der Hypotenusenfläche an den in der Figur schwarz gezeichneten Stellen mit Asphaltlack bestreicht. Blendet man λ ab, so sieht man den Fleck in einem vollständig dunklen Felde, und wenn man *l* abblendet, so erscheint in dem leuchtenden ringförmigen Felde der Fleck absolut schwarz. Bei gleicher Helligkeit der beiden Vergleichsfelder verschwinden die Ränder des elliptischen Fleckes vollkommen.

Fig. 54a.



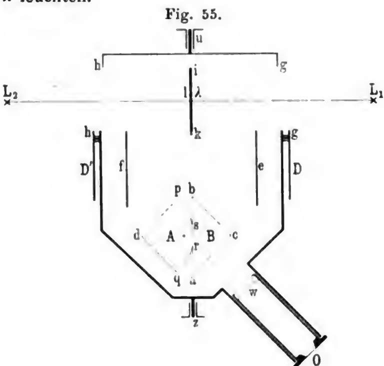
b) Anordnung und Beschreibung des Photometers.

Bei der gewählten Anordnung sind die leuchtenden Flächen λ und *l* ersetzt durch die Bilder, welche zwei Spiegel *e* und *f* (Fig. 55) von den beiden Seiten des Photometerschirmes *ik* entwerfen.

Auf der geraden Photometerbank befinden sich L_1 und L_2, sowie der undurchsichtige (am besten aus Gips hergestellte) Photometerschirm *ik*. Das diffuse, von den beiden Schirmseiten λ und *l* ausgehende Licht fällt auf die Spiegel *e* und *f*, welche es auf die Kathetenflächen *bc* und *dp* werfen. Der Beobachter bei *O* sieht senkrecht gegen *ac* und stellt durch die verschiebbare Lupe *w* scharf auf die

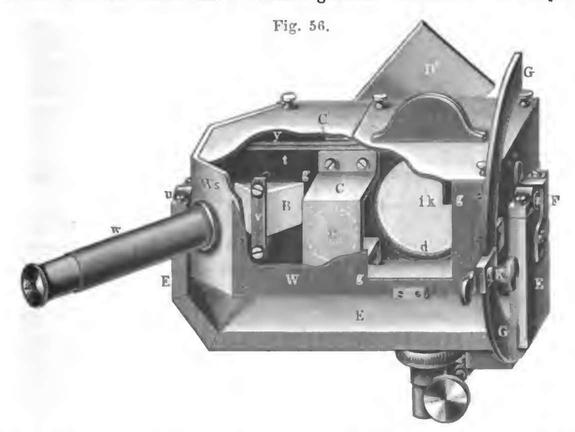
Fläche *arsb* ein; er sieht dann die elliptisch erscheinende Fläche *rs* im Lichte der Schirmseite *l*, die ringförmige Fläche im Lichte der Schirmseite λ leuchten.

Fig. 55.



Der Schirm *ik* ist mit den Spiegeln *e* und *f* und dem Prismenwürfel *AB* fest durch das Photometergehäuse verbunden. Die Lupe *w*

Fig. 56.



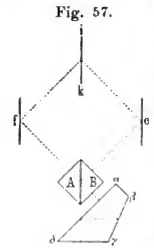
befindet sich in einem Rohre, welches in einem zweiten, in der Wand des Gehäuses befestigten Rohre verschiebbar ist. Rechts und links von dem Schirme befinden sich die zwei rechteckigen Lichteinströmungs-

öffnungen gg und hh, vor welche sich nach dem Gebrauch zwei Platten D und D' vorschlagen lassen, um das Verstauben des Apparates zu verhindern. Das Gehäuse läßt sich um die in der Schirmebene liegende und durch die Schirmmitte gehende Achse uz drehen.

Fig. 56 gibt eine perspektivische Ansicht des Photometeraufsatzes. Von dem Photometergehäuse sind die Seitenwand W und der Deckel abgebrochen gezeichnet, damit man ins Innere sehen kann; t und y sind Metallplatten, welche das Gehäuse in zwei gleiche Teile teilen und zur Befestigung der inneren Stücke dienen. Der Spiegel e ist mittels des hufeisenförmigen ⊐-Trägers C an t befestigt. C' ist ein ähnlicher Träger für den nicht sichtbaren Spiegel f. Das Prisma B des Photometerwürfels ist mittels v bei g an einen vorspringenden Rand von t geschraubt. ik ist der am herausnehmbaren Rahmen d befestigte Photometerschirm. Die Seitenwand Ws trägt das Okularrohr w; a ist das Okularloch. Von den Lichteinströmungsöffnungen ist nur gg und von den Staubschutzklappen nur D' sichtbar.

Das Photometergehäuse ist mittels der an y und t angedrehten Zapfen u und z in die Pfannen des Metallbügels E drehbar gelagert. E ist auf einem Stahlrohr befestigt, dessen Achse durch die Schirmmitte geht und auf der Umdrehungsachse uz des Gehäuses senkrecht steht. Für gewöhnlich steht die Ebene des Schirmes vertikal, und es läßt sich dann das Photometer *umlegen*, d. h. um die Achse uz um 180° drehen. In diesen beiden Lagen wird das Photometer durch eine Feder F des Bügels E festgehalten. Der Gradbogen G dient dazu, Messungen unter verschiedenen Ausstrahlungswinkeln gegen die Vertikale nach der Hartleyschen Methode (§ 129) ausführen zu können. Die Klemmschraube K hält dann das Gehäuse in jeder beliebig geneigten Lage fest.

Fig. 57.



c) Abänderung des Photometers durch Krüss, sowie durch Schmidt und Haensch.

Krüss[1]) schaltet bei diesem Photometer, sowie bei dem im folgenden Paragraphen zu beschreibenden Kontrastphotometer zwischen Photometerwürfel und Lupe ein Reflexionsprisma $\alpha\beta\gamma\delta$ (Fig. 57), wodurch er erreicht, daß die senkrecht aus dem Würfel austretenden Strahlen nach zweimaliger Reflexion in $\alpha\beta\gamma\delta$ senkrecht zu $\gamma\delta$ in der Richtung der Umdrehungsachse austreten. Alsdann braucht das Auge beim Umlegen des Photometers seinen Standort nicht zu ändern.

Schmidt und Haensch bringen das Reflexionsprisma $\alpha\beta\gamma\delta$ in etwas größere Entfernung vom Würfel, so daß die Strahlen nicht

[1]) J. f. G. u. W. 37, 61 (1894).

in der Umdrehungsachse, sondern parallel zu derselben aus $\alpha\beta\gamma\delta$ austreten. Beim Umdrehen des Photometers beschreibt die Achse des Beobachtungsrohres also einen Zylindermantel. Diese Anordnung wird gewählt, damit man stets sehen kann, in welcher Stellung sich die Lupe bei der letzten Messung befand. Bei der Krüßschen Anordnung kann man diesen Zweck in einfacher Weise dadurch erreichen, daß man auf dem Beobachtungsrohr eine Marke anbringt.

d) Ausführung der Messungen.

Methode 1 (Umlegungsmethode).

Man macht in einer Lage des Photometers, z. B. derjenigen (Lage A), wo sich die Lupe rechts von der Schirmebene befindet, die Einstellung r_1, r_2; man dreht sodann das Photometer um 180° (Lage B), macht die neue Einstellung r_1', r_2' und erhält

$$J_2 = \frac{r_2\, r_2'}{r_1\, r_1'} \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Im Falle der Gleichseitigkeit ist also

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{a}$$

Da r_1 und r_1' einerseits, sowie r_2 und r_2' andererseits nur sehr wenig voneinander abweichen, läßt sich Gleichung 1) ersetzen durch

$$J_2 = \frac{\left(\frac{r_2 + r_2'}{2}\right)^2}{\left(\frac{r_1 + r_1'}{2}\right)^2} \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

und

$$J_2 = \tfrac{1}{2}\left(\frac{r_2^2}{r_1^2} + \frac{r_2'^2}{r_1'^2}\right) \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Beweis von Gleichung 1). Es möge bezeichnen (s. Fig. 55, S. 175)

- E_λ und E_l die Beleuchtungen der Schirmseiten λ und l;
- e_λ und e_l die Flächenhellen von λ und l in den wirksamen Richtungen λe und lf (unter Ausstrahlungswinkeln von etwa 45°);
- m_λ und m_l die zugehörigen Reflexionskoeffizienten von λ und l;
- R_e und R_f die Reflexionsvermögen der Spiegel e und f in den entsprechenden Richtungen;
- D_e und D_f die Durchlässigkeitsvermögen des Photometerwürfels für die von e und f reflektierten Strahlen;
- h_f und h_e die Helligkeiten, mit welchen die Fläche rs und der übrige Teil von ab dem Auge ohne Lupe[1]) erscheinen.

---

[1]) Mit Lupe sind die Helligkeiten Dh_f und Dh_e (Anhang 4, 5).

Alsdann ist in Lage A des Photometers

$$e_\lambda = m_\lambda E_\lambda = m_\lambda \cdot \frac{J_1}{r_1^2}, \quad e_l = m_l E_l = m_l \cdot \frac{J_2}{r_2^2}.$$

Aus Satz B, Anhang 4, in Verbindung mit Gleichung 21), Anhang 3 folgt, daß die Wirkung auf das Auge so groß ist, als ob die Fläche rs bzw. ihre Umgebung mit der Flächenhelle

$$\mu R_f D_f e_l \text{ bzw. } \mu R_e D_e e_\lambda$$

in freier Luft leuchtet. Demnach ist

$$h_f = \mu \varkappa m_l R_f D_f \cdot \frac{J_2}{r_2^2}; \quad h_e = \mu \varkappa m_\lambda R_e D_e \cdot \frac{J_1}{r_1^2}.$$

Da $h_e = h_f$ gemacht wird, ergibt sich

$$J_2 = \frac{m_\lambda R_e D_e}{m_l R_f D_f} \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

In Lage B ist

$$J_2 = \frac{m_l R_f D_f}{m_\lambda R_e D_e} \cdot \frac{r_2'^2}{r_1'^2} \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Durch Multiplikation der Gleichungen 4) und 5) erhält man Gleichung 1).

Beispiel[1]). Es sei gefunden in Millimetern[2]):

$$r_1 = 756{,}8; \; r_2 = 1743{,}2; \; r_1' = 760{,}2; \; r_2' = 1739{,}8.$$

Ferner sei $J_1 = 4$ HK.

Gleichungen 1) bis 3) ergeben denselben Wert

$$J_2 = 21{,}09 \text{ HK}.$$

Methode 2.

Man kann, auch wenn das Photometer nicht vollständig gleichseitig ist, bei nur *einer* Lage des Photometers, z. B. A, richtig messen; man findet dann

$$J_2 = c \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

wo c eine Instrumentalkonstante ist, welche immer nur wenig von 1 verschieden sein soll und sich wegen der Unveränderlichkeit der einzelnen Teile mit der Zeit nur wenig ändert, falls man nach dem Gebrauche die Lichteinströmungsöffnungen durch die Schutzklappen schließt.

c läßt sich in der Form schreiben:

$$c = c_1 c_2 c_3 \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

wo

$$c_1 = \frac{m_\lambda}{m_l}; \quad c_2 = \frac{R_e}{R_f}; \quad c_3 = \frac{D_e}{D_f} \quad . \quad . \quad . \quad 7a)$$

---

[1]) Im Beispiel ist angenommen, daß L_1 und L_2 im Abstande 2504 mm feststehen und der Gipsschirm 4 mm dick ist, so daß $r_1 + r_2 = r_1' + r_2' = 2500$ mm ist (vgl. Fig. 150, § 138).

[2]) Für die Zwecke der Praxis genügt es, die Werte für die r auf ganze Millimeter, den etwa durch vierstellige Logarithmen gefundenen Wert J_2 auf drei Ziffern abzurunden. (Vgl. Anhang 1, Aufgabe 3).

Bestimmung der Konstanten c, c_1, c_2, c_3.

Hierbei werde angenommen, daß L_1 und L_2 zwei konstante Lichtquellen seien.

1. Bestimmung von c. Man macht in der Lage A die Einstellung r_1, r_2, in der Lage B die Einstellung r_1', r_2'. Dann ist nach Gleichungen 1) und 6)

$$c = \frac{r_2' r_1}{r_1' r_2} \quad \dots \dots \dots \quad 8)$$

Das letzte Zahlenbeispiel gibt $c = 0{,}994$.

Die Rechnung gestaltet sich einfacher, wenn L_1 fest mit dem Photometer verbunden, also $r_1 = r_1'$ ist; dieser Fall möge jetzt und bei der Bestimmung der anderen Konstanten zugrunde gelegt werden. Alsdann ist

$$c = \frac{r_2'}{r_2} \quad \dots \dots \dots \quad 9)$$

2. Bestimmung von c_1. Man dreht den Schirm in Lage A um 180°, so daß seine vorher rechte Seite zur linken wird (Lage A'), macht die Einstellung r_2'' und erhält

$$c_1 = \frac{r_2''}{r_2} \quad \dots \dots \dots \quad 10)$$

Beweis. Denn in Lage A ist

$$J_2 = c_1 c_2 c_3 \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot J_1.$$

Nach Umdrehung des Schirmes wird

$$J_2 = \frac{1}{c_1} \cdot c_2 c_3 \cdot \frac{r_2''^2}{r_1^2} \cdot J_1,$$

so daß

$$c_1 r_2^2 = \frac{1}{c_1} \cdot r_2''^2,$$

woraus sich unmittelbar Gleichung 10) ergibt.

3. Bestimmung von c_2. Man bedeckt in Lage A den Spiegel e durch den Spiegel I, dessen Reflexionsvermögen gleich R_1 sei. Ergibt sich die Einstellung r_2''', so ist

$$R_e = R_1 \cdot \frac{r_2'''^2}{r_2^2}.$$

Sodann nimmt man den Spiegel I von e fort und bedeckt mit ihm f. Ist r_2^{IV} die hierbei gefundene Einstellung, so ist

$$R_f = R_1 \cdot \frac{r_2^2}{r_2^{IV^2}},$$

mithin nach Gleichung 7a)

$$c_2 = \frac{r_2'''^2 \cdot r^{IV^2}}{r_2^4} \quad \dots \dots \dots \quad 11)$$

4. **Bestimmung von c_3.** Es ist

$$c_3 = \frac{c}{c_1 c_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 12)$$

5. **Bestimmung von $c_2 c_3$.** Man bestimmt $c_2 c_3$ aus

$$c_2 c_3 = \frac{c}{c_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 13)$$

oder man legt das in Lage A' befindliche Photometer um, macht die Einstellung r_2^v und erhält

$$c_2 c_3 = \frac{r_2^v}{r_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 14)$$

§ 84. Kontrastphotometer von Lummer und Brodhun[1]).

Das Gleichheitsphotometer läßt sich auf folgende Weise in ein Kontrastphotometer umwandeln. Man ersetzt das Prisma A in Fig. 52

Fig. 58.

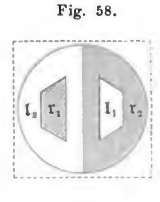
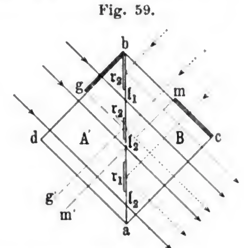


Fig. 59.



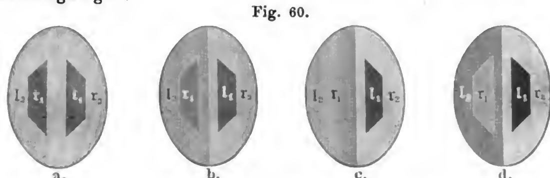
durch ein rechtwinkliges, gut auf B abgeschliffenes Prisma A' (Fig. 58 und 59) und nimmt auf dessen ebener Hypotenusenfläche an den Stellen $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2$ mittels Sandstrahlgebläses die oberste Glasschicht fort, so daß im ganzen *vier Felder* $\mathfrak{r}_2$, $\mathfrak{l}_1$, $\mathfrak{r}_1$, $\mathfrak{l}_2$ entstehen. Dann preßt man die Hypotenusenflächen von A' und B so innig aneinander, daß an allen polierten Stellen $\mathfrak{l}_1$ und $\mathfrak{l}_2$ der Würfel vollständig durchsichtig geworden ist. Schließlich werden die Kathetenflächen bd und bc (Fig. 59) nahezu bis zur Hälfte mit den Glasplatten bg und cm bedeckt, welche von dem auf sie auffallenden Licht denselben Betrag von etwa 92 Proz. durchlassen (vgl. Beisp. 4, Anhang 3).

Da an den Stellen $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2$ Glas mit Luft in Berührung ist, so wird hier das auf bc fallende Licht total reflektiert und auf ac geworfen; dagegen tritt das auf bd fallende Licht an den Stellen $\mathfrak{l}_1$ und $\mathfrak{l}_2$ geradlinig durch den Prismenwürfel hindurch. Demnach sieht ein senkrecht auf ac blickendes und auf ab akkommodierendes Auge die

[1]) Z. f. Instrk. **9**, 461 (1889); **12**, 41 (1892).

Felder $\mathfrak{l}_1$ und $\mathfrak{l}_2$ im Lichte der linken, die Felder $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2$ im Lichte der rechten Seite des Photometerschirmes. Stellt man nun auf Gleichheit der Felder $\mathfrak{r}_2$ und $\mathfrak{l}_2$ ein, so würden ohne die beiden Glasplatten *bg* und *cm* die vier Felder als eine zusammenhängende, gleich hell leuchtende Fläche erscheinen. Durch die Glasplatten wird indessen das bei $\mathfrak{l}_1$ durchgehende und bei $\mathfrak{r}_1$ reflektierte Licht um denselben Betrag geschwächt, während das bei $\mathfrak{r}_2$ reflektierte und das bei $\mathfrak{l}_2$ durchgehende Licht ungeschwächt bleibt. Demnach treten die Felder $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{l}_1$ gleich stark gegen die Felder $\mathfrak{r}_2$ und $\mathfrak{l}_2$ hervor, sobald die letzteren gleich hell erscheinen. Fig. 60 zeigt die hierbei auftretende Einstellungsfigur.

Fig. 60.



a. b. c. d.

Geht man aus dieser Lage, der sogenannten Nullage, mit dem Photometer nach rechts, so wird $\mathfrak{r}_2$ heller, $\mathfrak{l}_2$ dunkler; d. h. wenn die Buchstaben zugleich die Helligkeiten der Felder bezeichnen, so wird $\mathfrak{r}_2 > \mathfrak{l}_2$. Da nun stets $\mathfrak{r}_2/\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{l}_2/\mathfrak{l}_1$ gleich derselben Konstanten (etwa 1,08) sind, so müssen sich $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{l}_2$ nähern, $\mathfrak{r}_2$ und $\mathfrak{l}_1$ dagegen entfernen. Es geht also Fig. a zunächst in Fig. b, sodann, sobald $\mathfrak{r}_1 = \mathfrak{l}_2$ und $\mathfrak{r}_2/\mathfrak{l}_1 =$ etwa 1,16 geworden ist, in Fig. c über. In dieser Stellung erscheint die linke Hälfte des Gesichtsfeldes als eine gleichmäßig leuchtende Fläche, während sich der Kontrast der beiden Felder der rechten Seite verdoppelt hat. Bei weiterer Verschiebung nach rechts wird $\mathfrak{l}_2$ dunkler als $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{r}_2/\mathfrak{l}_1 > 1{,}16$ (Fig. d). Verschiebt man das Photometer von der Nullage nach links, so vertauschen sich die Rollen der rechten und linken Hälfte des Sehfeldes.

Da bei Einstellung auf gleichen Kontrast die Trennungslinie zwischen $\mathfrak{r}_2$ und $\mathfrak{l}_2$ vollständig verschwindet[1]), so kann neben dem Kontrastprinzip ebensogut die Einstellung auf gleiche Helligkeit von $\mathfrak{r}_2$ und $\mathfrak{l}_2$ als photometrisches Kriterium benutzt werden.

Stellung der Glasplatten.

Die Glasplatten *bg* und *cm* (Fig. 59) sind so gestellt, daß das von *g* auf *ac* gefällte Lot durch die Mitte des mittleren reflektierenden

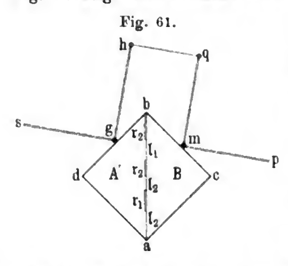
[1]) Ein Photometer ist nicht sorgfältig gearbeitet, bei welchem diese Trennungslinie und die Grenzen des linken Paralleltrapezes in Stellung Fig. 60 c (und des rechten Paralleltrapezes in der analogen Stellung bei Verschiebung des Photometers nach links) nicht vollständig verschwinden.

Feldes $\mathfrak{r}_2$, und das von m auf ad gefällte Lot durch die Mitte des mittleren durchlassenden Feldes $\mathfrak{l}_2$ geht. Demnach können die von g und m ausgehenden Strahlen nicht in das hinreichend weit von ac befindliche und auf ab akkommodierende Auge gelangen; d. h. es können die Kanten g und m der Glasplatten nicht gesehen werden.

Veränderung des Kontrastes.

Bei der eben beschriebenen Anordnung wurde ein konstanter Kontrast von etwa 8 Proz. zugrunde gelegt. Will man mit einem innerhalb gewisser Grenzen veränderlichen Kontrast arbeiten, so hat man sich einer geeigneten Kombination von zwei beweglichen oder zwei beweglichen und zwei festen oder vier beweglichen Kontrastplatten zu bedienen. Fig. 61 zeigt eine ebenfalls von Lummer und Brodhun angegebene Anordnung, mit welcher man sowohl positiven als auch negativen Kontrast herstellen kann. Unter einem positiven Kontrast werde ein solcher verstanden, bei welchem nach erfolgter Einstellung die Felder $\mathfrak{r}_1$ und $\mathfrak{l}_1$ heller als ihre Umgebung sind. Die rechtwinkligen Gelenke hgs und qmp sind um die vertikalen Achsen bei g und m drehbar. Die freien Enden der gleich langen Arme qm und hg sind mit dem Zwischenstück qh, welches gleich gm ist, verbunden. An allen vier Schenkeln gs, gh, mp und mq sind vertikale Glasplatten befestigt. Bilden die vier Glasplatten einen Winkel von 45° mit den Würfelflächen, so ist der Kontrast Null. Bei der Drehung der Platten nach rechts wird der Kontrast positiv, bei Drehung nach links wird er negativ.

Fig. 61.



Genauigkeit der Einstellung.

Nach Lummer und Brodhun beträgt der mittlere Fehler einer Einstellung aus 20 hintereinander mit negativem Kontrast ausgeführten Beobachtungen bei einem

Kontrast von	3	3,5	7	10	18	Proz.
	0,24	0,22	0,39	0,43	0,81	„

Bei einem geringeren Kontrast als 3 Proz. sind die Einstellungen, weil die Helligkeitsunterschiede dem Schwellenwerte zu nahe liegen, zu ermüdend und deshalb unsicher. Bei einem Kontrast von 3,5 Proz. ist die Empfindlichkeit bedeutend größer als beim Gleichheitsphotometer. Sie nimmt bei steigendem Kontrast ab und ist bei einem Kontrast von 18 Proz. schon entschieden kleiner als beim Gleichheitsphotometer.

Mithin wird man am besten mit einem möglichst geringen, aber noch deutlich und ohne Anstrengung sichtbaren Kontrast arbeiten. Für die Praxis genügt ein Kontrast von 8 Proz.; man braucht dann statt eines Glasplattenapparates, welcher die Einfachheit und Unveränderlichkeit des Photometers vermindern würde, nur die beiden festen Glasplatten *bg* und *cm* (Fig. 59).

§ 85. Photometer von Brücke [1]).

Brücke bedient sich der folgenden Anordnung, um Flächen, welche nur von je einer der beiden zu vergleichenden Lichtquellen beleuchtet werden, *eng aneinander zu lagern.* Eine Reihe von gleich großen, gleichschenklig rechtwinkligen Prismen aus gleich dicken und

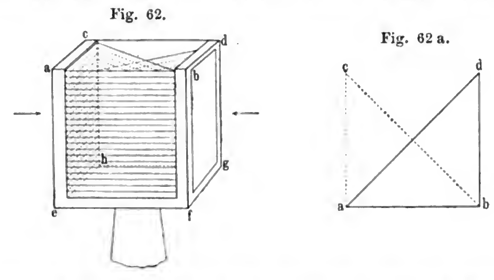


Fig. 62. Fig. 62 a.

nicht zu dicken, nahezu parallelen schlierenfreien Glasplatten werden in einem Gestell (Fig. 62) so übereinander gelegt, daß je eine Kathete *ab* jedes Dreiecks in die dem Beobachter zugekehrte Vorderebene der Glasmasse fällt, die Hypotenusen je zweier aufeinander folgender Dreiecke *ad* und *bc* (Fig. 62 a) sich senkrecht schneiden. Die Hypotenusenfläche und die beiden Kathetenflächen jedes Prismas sind poliert.

Die Seitenflächen des Gestells *ache* und *bdfg* sind mit durchscheinendem Papier bedeckt und durch die zu vergleichenden Lichtquellen beleuchtet. Der Beobachter sieht an der Vorderseite *ab* abwechselnd Streifen, welche von der einen und anderen Lichtquelle beleuchtet und von den Hypotenusenflächen gespiegelt sind, und stellt auf gleiche Helligkeit dieses Systemes von eng aneinander liegenden Vergleichsfeldern ein. Man sieht dann eine einzige zusammenhängende Fläche.

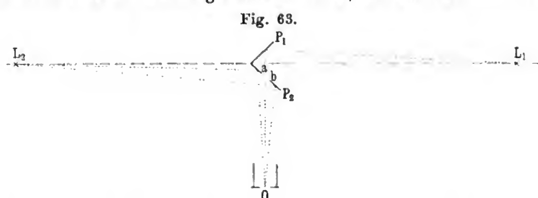
---

[1]) Z. f. Instrk. 10, 11 (1890); Wiener Ber. 84 (3), 425 (1881). Das Photometer wurde von Brücke für den Vergleich verschieden gefärbter Lichtquellen benutzt (vgl. § 106 f.).

§ 86. Dachphotometer von L. Weber[1]).

L. Weber erreicht die Anordnung eines Vergleichsfeldes inmitten des zweiten auf folgende einfache Weise. L_1 beleuchtet die Fläche P_1, L_2 die Fläche P_2 (Fig. 63) eines rechtwinklig umgebogenen undurchsichtigen Kartons unter (nahezu) 45°. P_2 enthält bei *ab* einen mit einem scharfen Messer geführten Schlitz, so daß man durch den-

Fig. 63.



selben einen Teil von P_1 sehen kann. Dieser Teil (der Schlitz) erscheint dann als heller oder dunkler Fleck auf dem Grunde von P_2; der Fleck verschwindet, sobald P_1 und P_2 gleich hell sind.

Eine ähnliche Anordnung gibt Trotter[2]) an; der dem Auge zugewandte Schirm ist bei ihm rostartig durchbrochen. Auch andere, z. B. Majorana[3]), verwerten dasselbe Prinzip.

§ 87. Das Milchglasplattenphotometer von L. Weber[4]).

a) Beschreibung des Photometers.

Fig. 64a gibt eine perspektivische Ansicht des Photometers; seine innere Einrichtung ist aus Fig. 64b ersichtlich. Auf dem als Fuß dienenden Aufbewahrungskasten ist die Säule T aufgeschraubt. An dieser ist das horizontale Rohr A befestigt. A trägt links das um die Achse von A drehbare und zu dieser senkrechte Rohr B, rechts das Gehäuse D für die als Vergleichslichtquelle dienende Benzinlampe L_a, welche die mittels Triebes in A verschiebbare Milchglasplatte G_a beleuchtet. Ein mit G_a fest verbundener Index gleitet über einer an der Außenseite von A angebrachten Millimeterteilung und gestattet den Abstand r_a (bzw. r_a', r_a'' ...) zwischen G_a und L_a unmittelbar abzulesen.

Durch ein Glimmerfenster q im Gehäuse D kann man die Flammenhöhe von L_a mittels einer dahinter gestellten Teilung auf Spiegelglas bis auf 0,2 mm ablesen. Krüss bedient sich hierzu seines optischen

[1]) Schriften d. naturw. Ver. f. Schleswig-Holstein 1893, Bd. 10.

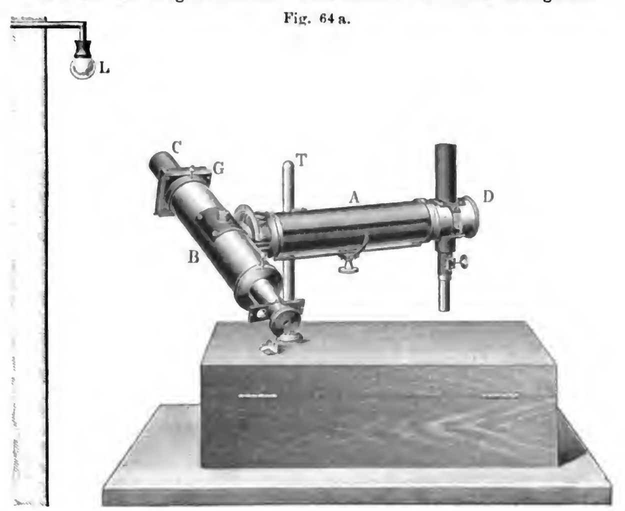
[2]) Proc. Phys. Soc. London 12, 354 (1893).

[3]) Rendic. R. Acc. dei Lincei (5) 9, 87 (1900).

[4]) Wied. Ann. 20, 326 (1883); J. f. G. u. W. 28, 267 (1885); Z. f. Instrk. 11, 6 (1891); J. f. G. u. W. 41, 193 (1898).

Flammenmessers (S. 107). Die Flamme wird von außen her in geeigneter Weise auf die vorgeschriebene Flammenhöhe von 20 mm einreguliert.

Fig. 64 a.



L_a ist gegen A durch eine in Fig. 64 b nicht gezeichnete Glasplatte zur Vermeidung von Luftströmungen abgeschlossen.

B trägt bei *G* ein Gehäuse zur Aufnahme von Rauch- und Milchgläsern, bei *W* einen Lummer-Brodhunschen Gleichheits- oder Kontrastwürfel[1]), bei *O* ein Okular zum Beobachten des Würfels. *B* läßt sich durch Drehen um die Achse von *T* und um die Achse von *A* auf jeden Punkt des Raumes einstellen.

Fig. 64 b.

Zum Abblenden fremden Lichtes wird auf *B* bei *G* das Rohr *C* gesetzt.

Die photometrische Einstellung erfolgt stets durch Verschieben der Milchglasplatte G_a. Dabei ist die Anordnung immer so zu treffen, daß der Abstand zwischen G_a und

[1]) Früher benutzte Weber ein rechtwinkliges Reflexionsprisma.

L_a größer als 10 cm bleibe, weil sonst für L_a das Entfernungsgesetz nicht mehr gilt.

Dem Photometer sind folgende Stücke beigegeben: eine mattweiße Papptafel mit Stativ, eine von Weber mit μ bezeichnete mattierte Milchglasplatte, zwei Rauchglasplatten[1]) 1 und 2, sechs Milchglasplatten Nr. 3 bis 8, sowie zwei Milchglasplatten mit photographischen Zeichnungen für Sehschärfenbestimmungen (§ 108). Die optischen Konstanten C_3 usw. dieser Stücke werden zwar vom Verfertiger des Photometers bestimmt; sie sind jedoch von Zeit zu Zeit neu zu bestimmen.

b) Messung der Lichtstärke.

Man richtet das Rohr B auf die Mitte der zu messenden Lampe L (in Fig. 64 a eine elektrische Glühlampe), setzt bei G die Milchglasplatte 3 ein, macht durch Verschieben der Milchglasplatte G_a eine photometrische Einstellung und liest an der Teilung von A den Abstand r_a ab. Bezeichnet r den besonders zu messenden Abstand zwischen L und Milchglasplatte 3, so ist

$$J = C_3 \cdot \frac{r^2}{r_a^2} \quad \dots\dots\dots\dots \quad 1)$$

wo C_3 eine Konstante bezeichnet und r sowie r_a beide entweder in Centimetern oder Metern gezählt werden.

Beweis. Die dem Auge zugewandten Seiten der Platten 3 und G_a sind hier die Photometerfelder. Die Flächenhellen e und e_a dieser Felder in zu denselben senkrechten Ausstrahlungsrichtungen sind $e = t\,J/r^2$; $e_a = t_a\,J_a/r_a^2$, wenn t und t_a die Durchlässigkeitskoeffizienten (S. 88) der Platten für senkrechtes Auffallen und senkrechtes Ausstrahlen ($i = \varepsilon = 0$) und J_a die Lichtstärke der Benzinkerze bezeichnen. Durch die photometrische Einstellung wird $e = c_3\,e_a$ gemacht, wo c_3, wie in Gleichung 7a), S. 178, das Verhältnis der Durchlässigkeitvermögen des Photometerwürfels für die reflektierten und durchgehenden Strahlen bezeichnet. Mithin ergibt sich Gleichung 1), wenn die Konstante $c_3\,t_a\,J_a/t$ gleich C_3 gesetzt wird.

Beispiel. $C_3 = 0{,}38$; $r = 108$ cm; $r_a = 20{,}9$ cm gibt

$$J = 0{,}38\ \frac{108^2}{20{,}9^2} = 10{,}1\ \text{HK}.$$

Bei stärkeren Lichtquellen nimmt man statt der Platte 3 die Platten 3 + 4 oder 3 + 4 + 5 usw. und hat sodann in Gleichung 1) C_3 durch die Konstanten C_4 oder C_5 usw. zu ersetzen.

c) Messung der Beleuchtung.

Wenn man in einem Dunkelzimmer eine Reihe von Lichtquellen L', L''... hat, deren Lichtstärken bekannt sind, so kann man die Beleuchtung, die irgend eine Ebene in diesem Raume erhält, direkt berechnen [s. Gleichung 1), S. 92]. Wenn jedoch die Wände Licht

[1]) Statt der beiden Rauchgläser wurden früher eine mattierte Glasplatte und eine mit Überfangglas versehene Glasplatte benutzt.

reflektieren, so läßt sich die Beleuchtung nur ganz annäherungsweise berechnen (vgl. § 155), wohl aber mit demWeberschen Photometer (und ähnlichen Photometern) mit einer für die Praxis hinreichenden Genauigkeit messen.

Methode α. Benutzung einer weißen, diffus reflektierenden Papptafel.

Man nimmt bei schwächeren Beleuchtungen bei G die Platten heraus und stellt in der zu untersuchenden Ebene eine mattweiße Papptafel S auf einem besonderen Stativ oder in geeigneter Verbindung mit dem Photometer [Krüss[1])] auf. Hierauf wird das Rohr B auf die Mitte der Papptafel gerichtet (vgl. Fig. 66) und die Einstellung r_a gemacht. Der Winkel ε, den das Lot auf der Papptafel mit der Achse von B macht, muß dabei möglichst klein (jedenfalls kleiner als 30°) sein. Die gesuchte Beleuchtung ist dann

$$E = \frac{C_0'}{r_a^2} \text{ bzw. } \frac{10\,000\, C_0'}{r_a^2}, \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

wo C_0' für ein gegebenes ε nach Weber eine Konstante ist und r_a in Metern bezw. Centimetern gemessen wird.

Beweis. Die Photometerfelder sind hier S und G_a. Weber nimmt nun an, daß S eine orthotrope Substanz ist, und setzt gemäß Gleichung 3), S. 92, $e = m\,E$, wo er m als eine nur mit ε veränderliche Größe ansieht. Andererseits ist wieder $e_a = t_a\,J_a/r_a^2$, und da $e = c_3\,e_a$, ergibt sich Gleichung 2), wenn gesetzt wird

$$\frac{c_3\,t_a\,J_a}{m} = C_0' \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2\text{a})$$

Beispiel. $C_0' = 0{,}15$; $r_a = 14{,}4$ cm gibt

$$E = \frac{10000 \,.\, 0{,}15}{14{,}4^2} = 7{,}2 \text{ Lux.}$$

Bei stärkeren Beleuchtungen schiebt man je nach der Stärke das Rauchglas 1 allein oder die Rauchgläser 1 + 2 oder anstatt der Rauchgläser die Platte 3 bzw. 3 + 4, 3 + 4 + 5 usw. in den Kasten. Man hat sodann in Gleichung 2) statt der Konstanten C_0' die Konstanten C_1' C_2' C_3' C_4' C_5' zu setzen.

Fig. 65.

So lange ohne Glasplatte oder nur mit den Rauchgläsern allein gemessen wird, kommt es im allgemeinen auf den Abstand zwischen Papptafel und Photometer nicht an. Sobald aber die Milchgläser eingeschoben werden, darf der Abstand nur so groß sein, daß alle in Fig. 65 gestrichelt gezeichneten Linien den Papierschirm treffen. Nur in diesem Falle, wo der dem Pappschirme zugewandte

[1]) J. f. G. u. W. 41, 85 (1898); vgl. Kermauner und Prausnitz, J. f. G. u. W. 40, 577 (1897); Prausnitz, ebenda 42, 109 (1899).

Rand des Rohres C die Randteile von s abblendet, ist die auf dem Milchglase erzeugte Beleuchtung derjenigen des Schirmes proportional. (Vgl. § 36).

Methode β. Benutzung einer mattierten, diffus durchlassenden Milchglasplatte μ.

Man nimmt das Abblendungsrohr C ab, befestigt μ vor dem Gehäuse G und stellt μ genau an den Ort und in die Lage der vorher benutzten Papptafel. Man hat dann

$$E = \frac{C''_{\mu}}{r_a^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{10000\, C''_{\mu}}{r_a^2} \quad \ldots \ldots \quad 3)$$

wo C''_{μ} wieder eine Konstante ist.

Bei Benutzung von $\mu + 3$, $\mu + 4 \ldots$ wird C''_{μ} ersetzt durch C''_3, $C''_4 \ldots$

d) Bestimmung der Konstanten.

1. C_3. Man beleuchtet die Platte 3 durch eine Normallampe L_n aus der Entfernung r_n senkrecht, macht die Einstellung r'_a und erhält

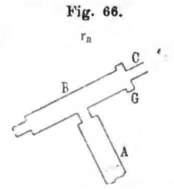
$$J_n = C_3 \cdot \frac{r_n^2}{r_a'^2}, \text{ demnach } C_3 = \frac{r_a'^2}{r_n^2} \cdot J_n.$$

Beispiel. Es sei $J_n = 16{,}0$ HK; $r_n = 150$ cm; $r'_a = 23{,}2$ cm. Alsdann wird

$$C_3 = \frac{23{,}2^2}{150^2} \cdot 16{,}0 = 0{,}38.$$

2. C'_0. Obwohl streng genommen C'_0 außer von dem Winkel ε auch noch von der Verteilung der einzelnen Lichtquellen abhängt [Gleichung 4), S. 92], wird nach Weber C'_0 nur für senkrecht auf den Pappschirm fallendes Licht bestimmt. Man stellt den Schirm S (Fig. 66) in einem Dunkelzimmer so auf, daß das Lot auf den Schirm ungefähr denselben Winkel ε mit der Achse von B wie bei der Bestimmung der Beleuchtung bildet. Hierauf beleuchtet man den Schirm durch die in der Entfernung r_n befindliche Normallampe L_n senkrecht und macht die photometrische Einstellung r'_a. Alsdann ist

Fig. 66.



$$E = \frac{J_n}{r_n^2} = \frac{C'_0}{r_a'^2}, \text{ demnach } C'_0 = \frac{r_a'^2}{r_n^2} \cdot J_n.$$

Die Größe C'_0 ändert sich mit dem Ausstrahlungswinkel ε. So ergab sich z. B. bei einem in der Reichsanstalt untersuchten Photometer für

ε =	5	10	20	30°
C'_0 =	0,13	0,14	0,15	0,16.

Für $\varepsilon > 30^0$ nahm C_0' mit wachsendem ε sehr schnell zu. Bei den Messungen sollte ε deshalb, wie bereits erwähnt wurde, niemals größer als 30^0 gewählt werden.

Aus Gleichung 2a) folgt, daß mit wachsendem ε der Reflexionskoeffizient m zunächst verhältnismäßig langsam, dann für $\varepsilon > 30$ schneller abnimmt. Der Schirm erscheint also um so dunkler, je schräger man auf ihn blickt. Bei senkrechter Beleuchtung ist die Lichtstärke unter dem Ausstrahlungswinkel ε nicht $\cos \varepsilon$ proportional; *das Lambertsche $\cos \varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz ist also nicht einmal für $i = 0$ gültig.*

3. C_μ''. Man beleuchtet die Platte μ durch eine Normallampe L_n und findet wie bei C_0'

$$C_\mu'' = \frac{r_a'^2}{r_n^2} \cdot J_n.$$

4. C_4, C_5 ... Man mißt entweder, wie bei C_3, direkt mittels einer Normallampe oder führt mittels einer konstanten und in konstanter Entfernung von Platte 3 gehaltenen Lichtquelle (Petroleumlampe, Gasglühlicht, besser elektrische Glühlampe), deren Lichtstärke nicht bekannt zu sein braucht, relative Messungen in folgender Weise aus. Man mißt nacheinander mit Platte 3 und 3 + 4. Ergeben sich hierbei die Einstellungen r_a' und r_a'', so ist

$$C_4 = \frac{r_a''^2}{r_a'^2} \cdot C_3.$$

Sodann mißt man nacheinander mit 3 + 4 und 3 + 4 + 5 und erhält aus den Einstellungen r_a'' und r_a'''

$$C_5 = \frac{r_a'''^2}{r_a''^2} \cdot C_4.$$

5. C_1', C_2', C_3' ... und C_3'', C_4'' ... In derselben Weise wie bei C_4, C_5 ... bestimmt man durch abwechselnde Beobachtungen C_1'/C_0', C_2'/C_1' ... und C_3''/C_μ'', C_4''/C_3'' ... Bei der Bestimmung von C_3' ... ist darauf zu achten, daß der Schirm richtig aufgestellt (s. Fig. 65) und an den innerhalb des Strahlenkegels gelegenen Stellen völlig gleichmäßig beleuchtet ist.

e) Mitteilung einiger Zahlenwerte.

Für ein in der Reichsanstalt untersuchtes Photometer ergaben sich die folgenden Werte:

	für $\varepsilon = 30^0$:	
$C_3 = 0{,}38$	$C_0' = 0{,}15$	$C_\mu'' = 0{,}60$
$C_4 = 2{,}13\ C_3$	$C_1' = 3{,}96\ C_0'$	
$C_5 = 3{,}97\ C_3$	$C_2' = 18{,}4\ C_0'$	
$C_6 = 7{,}66\ C_3$		
$C_7 = 14{,}2\ C_3$		
$C_8 = 24{,}4\ C_3$		

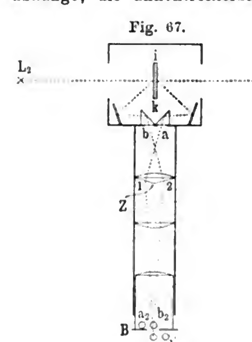
Die Konstanten C_3, C_0' und C_μ'' sind von der Lichtstärke J_a der Benzinlampe, C_0' außerdem noch von der Beschaffenheit (Reinheit) der Papptafel abhängig. Wegen dieser Abhängigkeit sind hier nur die Verhältniszahlen C_4/C_3, $C_5/C_3 \ldots$; C_1'/C_0', C_2'/C_0' angegeben. Die Konstanten sind außerdem von der Farbe der zu messenden Lichtquelle abhängig, da die Milchglasplatten die roten Strahlen besser als die blauen durchlassen. Bei der Bestimmung der angegebenen Konstanten wurde Nernstlicht benutzt.

f) Vorzüge und Nachteile des Weberschen Photometers.

Das Instrument bedarf keines sorgfältig geschwärzten Dunkelzimmers; es hat eine sehr kompendiöse Gestalt und eignet sich deshalb als tragbares Photometer.

Die Flammenhöhe der Benzinlampe läßt sich nur bis auf etwa 0,2 mm einstellen; infolge dieser Unsicherheit schwankt die Lichtstärke der Benzinlampe, welche etwa 0,37 HK beträgt, um etwa 2 Proz. Ein weiterer Übelstand ist, daß diese Lichtstärke von der Beschaffenheit des Brennmaterials, das kein genau definierter Stoff ist, und von der Beschaffenheit der im Lampengehäuse befindlichen Verbrennungsluft abhängt, die unkontrollierbaren Einflüssen ausgesetzt ist. Deshalb empfiehlt Uppenborn an Stelle der Benzinlampe kleine konstante elektrische Glühlampen, welche auf eine bestimmte Spannung oder Stromstärke einreguliert werden.

Fig. 67.



§ 88. Photometeraufsatz von Martens[1]).

Gleichheitsphotometer. L_1 und L_2 beleuchten einen Gipsschirm $i\,k$ (Fig. 67); das von den beiden Schirmseiten ausgehende Licht wird durch je einen Spiegel und ein Reflexionsprisma durch die Öffnungen a und b ins Okularrohr geworfen. Diese Strahlen durchlaufen dann nacheinander eine plankonvexe Objektivlinse, das daran angekittete Zwillingsprisma Z mit den Hälften 1 und 2 und die beiden Linsen eines Ramsdenschen Okulars.

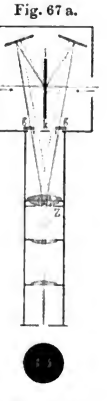
Denken wir uns zunächst Z fort, so werden die durch a und b eintretenden Strahlen zu je einem Bilde in der Ebene der Blende B

---

[1]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 1, 278 (1899); J. f. G. u. W. 43, 250 (1900).

vereinigt. Durch Einschaltung von Z wird bewirkt, daß jedes der beiden Bilder durch die Hälfte 1 nach rechts, durch die Hälfte 2 nach links verschoben wird. Es entstehen also statt zweier Bilder im ganzen vier, und zwar erzeugen die durch 1 gehenden Strahlen die Bilder a_1 und b_1, dagegen die durch 2 gehenden Strahlen die Bilder a_2 und b_2 der Öffnungen a und b. Die Blende läßt nur das Licht der aufeinander fallenden Bilder a_1 und b_2 hindurch, während sie die Bilder a_2 und b_1 abblendet. Der Beobachter, der durch die Blende sieht und mittels des Okulars scharf auf die Grenze der beiden Felder 1 und 2 akkommodiert hat, sieht also, wie die in der Figur gezeichneten Strahlen zeigen, das Feld 1 bzw. 2 durch Licht beleuchtet, welches von a bzw. b ausgegangen ist, also von L_1 bzw. L_2 herrührt. Da sich das Auge unmittelbar hinter der Blende, also am Orte der Bilder a_1 und b_2 befindet [1]), so wird seine Pupille stets ausgefüllt. Hierdurch wird erreicht, daß 1 und 2 gleichmäßig leuchtend erscheinen, und zwar, abgesehen von Reflexions- und Absorptionsverlusten, 1 mit der Helligkeit von der rechten, 2 mit der Helligkeit der linken Schirmseite. Eingestellt wird durch Abstandsänderung auf gleiche Helligkeit der beiden Vergleichsfelder 1 und 2. Dabei verschwindet die Trennungslinie vollkommen, wenn der Steg zwischen den Öffnungen a und b entfernt ist. Nach Brodhun und Schönrock [2]) erklärt sich das Verschwinden der Trennungslinie im Gesichtsfelde dieses Photometers sowie aller Photometer, bei denen auf gleiche Helligkeit zweier, durch eine scharfe Grenze voneinander getrennter Felder eingestellt wird — z. B. der Lummer-Brodhunschen Würfel —, durch die Beugung des Lichtes an der die Felder trennenden Kante.

Fig. 67 a.



Kontrastphotometer. Das eben beschriebene Photometer geht in ein Kontrastphotometer über, wenn man das Zwillingsprisma durch ein Prisma Z mit vier brechenden Flächen (Fig. 67 a) ersetzt und die Glasplatten gg einführt. Das Auge sieht dann vier Felder; die horizontal schraffierten sind von der rechts stehenden, die schräg schraffierten von der links stehenden Lichtquelle beleuchtet. Durch den von den Glasplatten gg veranlaßten Lichtverlust sind die beiden inneren Felder etwas dunkler als die äußeren.

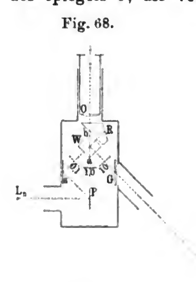
Ein Zwillingsprisma wurde für photometrische Zwecke zuerst von Frey und Kries [3]) beschrieben und sodann von A. König bei seinem Spektralphotometer (§ 119) angewandt.

[1]) Anwendung der Maxwellschen Methode (§ 119) auf weißes Licht.
[2]) Z. f. Instrk. 24, 70 (1904).
[3]) Arch. f. Anat. u. Physiol., Physiol. Abt., S. 336 (1881).

§ 89. Beleuchtungsmesser von Krüss[1]).

Die Hefnerlampe L_n (Fig. 68) befindet sich in einem in der Figur nicht gezeichneten Kasten, der in einer Führung verschoben werden kann und durch einen gleichfalls nicht angegebenen Balg mit einem etwas modifizierten Lummer-Brodhunschen Photometerkopf (S. 176) verbunden ist. L_n beleuchtet den weißen Photometerschirm P. Ein zweiter, fest mit dem Apparate verbundener, P möglichst gleicher Schirm F wird in die zu untersuchende Fläche gebracht, indem man den Photometerkopf um eine mit der Mittelsenkrechten von P identische horizontale Achse dreht. Die von P kommenden Strahlen fallen mittels des Spiegels s, die von F kommenden nach Durchgang durch einen Glasplattensatz G, welcher möglichst denselben Lichtverlust wie der Spiegel hervorruft, auf den Lummer-Brodhunschen Photometerwürfel W. Bei G befindet sich ein nach F gerichtetes Rohr zum Abblenden falschen Lichtes. Das beobachtende Auge sieht durch das Okular O und das Reflexionsprisma R auf die Hypotenusenfläche ab. Indem man durch Verschieben von L_n auf gleiche Helligkeit der in ab liegenden Vergleichsfelder einstellt, wird die Beleuchtung von P (nahezu) gleich derjenigen von F gemacht. Die Beleuchtung auf P kann unmittelbar an einer Teilung abgelesen werden, längs welcher L_n verschiebbar ist.

Fig. 68.



Der Abstand zwischen L_n und P kann von 0,5 bis 0,1 m, demnach die auf P erzeugte Beleuchtung von 4 bis 100 Lux geändert werden. Zur Vergrößerung des Meßbereiches wird eine Rauchglasplatte benutzt, welche 10 Proz. des auffallenden Lichtes durchläßt. In den in der Figur mit 1,0 bezeichneten Stellungen ist sie ausgeschaltet; in den mit 0.1 und 10 bezeichneten Stellungen ist sie in den Gang der von P bzw. F kommenden Strahlen eingeschaltet. Der Meßbereich ist demnach folgender:

Stellung des Rauchglases auf						
0,1 :	Bereich von	0,4	bis	10	Lux
1,0 :	„	4	„	100	„
10 :	„	40	„	1000	„

Die eben besprochene Vorrichtung verdankt ihre Entstehung der Anregung durch einen von Wingen[2]) unter der Bezeichnung „Helligkeitsprüfer“ konstruierten einfachen und billigen Apparat, mit welchem jeder Laie leicht bestimmen kann, ob ein horizontaler Arbeitsplatz eine Beleuchtung von 10 bis

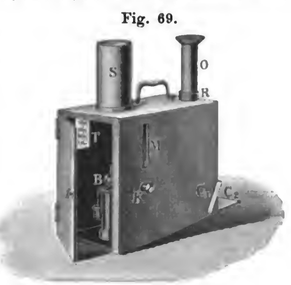
[1]) J. f. G. u. W. 45, 738 (1902).

[2]) D. R.-G.-M. 166 461. Wingen hat die Herstellungslizenz den Firmen A. Krüss in Hamburg und F. Tiessen in Breslau erteilt.

50 Lux erhält. Diese Grenzen werden gewählt, weil H. Cohn[1]) 50 Lux als mittlere zum Lesen erforderliche Beleuchtung fordert und 10 Lux als das Minimum bezeichnet, unter welchem das Lesen schädlich ist.

Bei dem Wingenschen Apparate in der von Krüss[2]) verbesserten Anordnung (Fig. 69) wird ein weißer Schirm c_1 durch eine Benzinlampe B beleuchtet. c_1 und B sind in einem innen geschwärzten Kasten eingeschlossen. Ein c_1 möglichst gleicher, unten am Kasten befindlicher und in denselben zurückschiebbarer Schirm c_2 wird an den zu untersuchenden Arbeitsplatz gebracht. Der Apparat enthält ferner eine Visiervorrichtung, bestehend aus einer Marke M an einem Glasfenster und aus einer an der gegenüberliegenden Wand angebrachten Teilung mit fünf, die Bezeichnung 10, 20, 30, 40, 50 tragenden Strichen. Stellt man die Flammenspitze durch Visieren über M auf die Striche 10, 20 ... ein, so wird c_1 mit 10, 20 ... Lux beleuchtet. Der Beobachter sieht durch das Okularrohr O auf die beiden Schirme c_1 und c_2, deren Färbung sehr verschieden ist, da ja c_1 durch die Benzinlampe, c_2 durch Tageslicht beleuchtet ist. Infolgedessen ist eine Vergleichung der Helligkeiten von c_1 und c_2 für einen Laien sehr schwierig (vgl. § 102). Um diese Schwierigkeit zu umgehen, wird in O bei R ein *rotes* Glas eingesetzt, wodurch man die beiden Schirme in der gleichen roten Farbe sieht. Auf diese Weise kann man leicht abschätzen, ob der Arbeitsplatz in *diesem* Lichte eine zwischen 10 und 50 Lux liegende Beleuchtung erhält.

Fig. 69.



Solche Messungen in rotem Lichte sind aber, worauf Weber und auch Krüss[3]) aufmerksam machen, nicht einwandfrei, da die Benzinlampe relativ viel reicher als das Tageslicht an roten Strahlen ist. Infolgedessen ist die wirkliche Beleuchtung auf c_2 nach einer ungefähren Schätzung Webers etwa 2,5 mal so groß wie die durch Vergleich im roten Lichte ermittelte. Will man genauere Werte erhalten, so muß man nach dem Vorgange von Macé de Lépinay und Nicati (§ 103) sowie von Weber (§ 108) auch noch Messungen in grünem Lichte machen und aus beiden Messungen mittels der Weberschen Tabelle VI (Anhang) nach den in § 108 gemachten Vorschriften die wirkliche Beleuchtung berechnen. Am besten ist es auf jeden Fall, ohne Einschaltung eines farbigen Glases zu beobachten.

Krüss weist darauf hin, daß Cohn seine die obigen Normen begründenden Versuche in rotem Lichte ausgeführt hat. Die Ergebnisse Cohns bedürfen deshalb noch einer Nachprüfung für weißes Licht.

Beim Wingen-Krüssschen Apparate wird nur durch Änderung der Flammenhöhe eine photometrische Einstellung gemacht. Er gehört also nicht zu den Abstandsphotometern; nichtsdestoweniger wurde er an dieser Stelle beschrieben, erstens weil er der Vorgänger des Krüssschen Apparates ist, und zweitens, weil wir in § 95 einen ähnlichen, ebenfalls von Wingen und Krüss konstruierten Apparat besprechen werden.

---

[1]) Der Beleuchtungswert der Lampenglocken, S. 7, Bergmann, Wiesbaden, 1885; Berl. klin. Wochenschr. Nr. 51, 1885.

[2]) J. f. G. u. W. 45, 738 (1902).

[3]) Ebenda 47, 917 (1904).

§ 90. Beleuchtungsmesser von Martens[1]).

Beschreibung des Apparates. Die Strahlen der Vergleichslichtquelle L_a (Benzinkerze) beleuchten nach Reflexion an den beiden Spiegeln s_1 und s_2 und dem Reflexionsprisma p die Milchglasplatte m (Fig. 70 a und b). Der Gipsschirm F wird in die Ebene gebracht, deren Beleuchtung man messen will. Die von m und F ausgehenden Strahlen treten durch die Öffnungen a und b in das § 88 beschriebene Photometer. Durch Verschieben des Spiegelsystems $s_1 s_2$ wird auf gleiche Helligkeit der Vergleichsfelder 1 und 2 eingestellt.

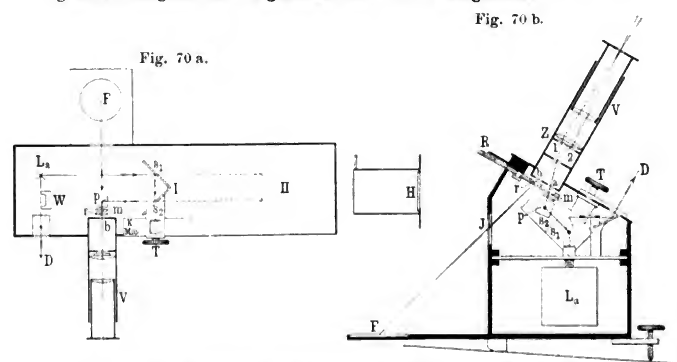


Fig. 70 a. Fig. 70 b.

Die Weglänge r_a der Strahlen zwischen L_a und m kann an einer Teilung Mm in Centimetern, die auf F herrschende Beleuchtung an einer zweiten Teilung K in Lux abgelesen werden. Die letztere ist nach der Formel

$$E = \frac{C}{r_a^2}$$

berechnet; die Konstante C wird mittels einer Normallampe bestimmt.

Eine Revolverscheibe R mit verschiedenen Rauchgläsern dient zur Vergrößerung des Meßbereiches; die Stellung von R wird durch einen Zeiger angegeben, der auf C_1, C_2 ... C_5 zeigt. Bei Einstellung auf C_3 sind die an der Teilung K abgelesenen Zahlen richtig; bei C_1 sind die abgelesenen Zahlen durch 100, bei C_2 durch 10 zu dividieren, bei C_4 mit 10, bei C_5 mit 100 zu multiplizieren.

Der Apparat läßt sich auch zu **Lichtstärkemessungen** benutzen. Alsdann wird die vertikale Milchglasscheibe H (Fig. 70 b) vor die Öffnung J gesetzt, durch welche sonst die von F kommenden Strahlen in den Photometerkasten eintreten. In dem links von H

[1]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 5, 436 (1903).

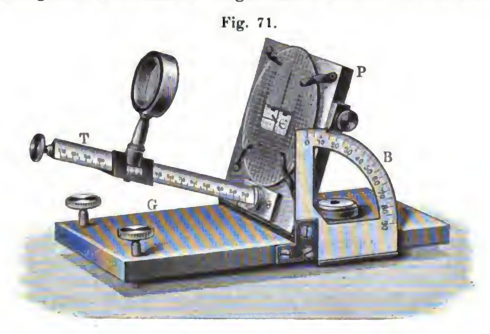
gezeichneten Tubus ist ein zweiter (in der Figur nicht gezeichneter) drehbar angeordnet, welcher links einen unter 45° gegen die Drehungsachse geneigten Spiegel nach Perry und Ayrton (§ 130) trägt. Die Berechnung erfolgt nach der Formel

$$J = \frac{C' r^2}{r_a^2}.$$

Für Messungen in einer Schule ist nach Martens folgendes zu beachten:

Die Messungen in den einzelnen Schulzimmern sollten nur bei vollständig bedecktem Himmel vorgenommen werden. So erhält man die

Fig. 71.



Verteilung der Beleuchtung im Schulzimmer. Schulen in verschiedenen Städten würde man hiernach nicht ohne weiteres vergleichen können, weil die Flächenhelle des Himmels bei den Messungen eine ganz verschiedene gewesen sein kann. Die Messungen in den Innenräumen werden erst dann vergleichbar, wenn man gleichzeitig, etwa auf dem Dache der Schulgebäude, die Beleuchtung E' gemessen hat. Dividiert man die für die einzelnen Plätze erhaltenen Werte durch E', so erhält man Zahlen, welche die Beleuchtung des Schulzimmers als eine Eigenschaft seiner Bauart und unabhängig von der Flächenhelle des Himmels, die zufällig während der Messung herrschte, kennzeichnen.

Weber[1]) bestimmt entsprechende Verhältniszahlen mittels seines *Raumwinkelmessers.* Der Apparat (Fig. 71) gründet sich darauf, daß die durch das diffuse Licht des Himmels auf einem Arbeitsplatz im Zimmer erzeugte Beleuchtung nach Gleichung 6), S. 76, 1. der Flächenhelle e des Himmels, 2. dem räumlichen Winkel Ω, unter welchem der von einem Tischpunkte aus sichtbare Himmelsabschnitt erscheint, 3. dem $\cos$ des Einfallswinkels i proportional ist. Mittels einer auf einem Maßstab T verschiebbaren Linse wird die Fensteröffnung auf einer in gleiche Quadrate geteilten Papierfläche P

[1]) Z. f. Instrk. 4, 343 (1884).

abgebildet. Zieht man von den Randstrahlen des hellen Himmelsbildes gerade Linien nach dem Mittelpunkte (genauer nach dem zweiten Hauptpunkte) der Linse, so bilden diese genau denselben räumlichen Winkel wie diejenigen Strahlen, welche von den Randpunkten des Fensters nach dem Mittelpunkte (genauer nach dem ersten Hauptpunkte) der Linse, oder was auf nahezu dasselbe herauskommt, nach einem Punkte des zu untersuchenden Arbeitsplatzes gezogen werden. Die Zahl N derjenigen Quadrate des Papieres, welche von dem hellen Himmelsbilde bedeckt werden, gibt dann ein Maß für die Größe des Raumwinkels Ω. Ferner hat man den Apparat gleichzeitig so einzustellen, daß der Mittelpunkt des hellen Fensterbildes auf die durch einen Stift C markierte Mitte von P fällt. Alsdann gibt die von der Linsenmitte nach C gezogene Linie zugleich die mittlere Richtung der Lichtstrahlen an, und man liest an dem Gradbogen B den Winkel α dieser Richtung gegen die Horizontalebene ab, so daß $i = 90 - \alpha$ der Einfallswinkel der auf den horizontalen Arbeitsplatz fallenden Strahlen ist. Dann ist die Größe

$$N \cos i = N \sin \alpha,$$

der sogenannte reduzierte Raumwinkel, diejenige Zahl, welche die Beleuchtung auf dem Arbeitsplatze kennzeichnet.

Hierbei ist angenommen, daß N hinreichend klein ist. Im Falle größerer Fensteröffnungen oder mehrerer Fenster mißt man für die einzelnen Teile N und i und erhält in der Summe der Einzelprodukte $N \cos i$ den gesamten reduzierten Raumwinkel.

Hat man infolge zu großer Nähe am Fenster eine merkliche Verschiebung der Linse aus ihrem normalen Abstande $l_1 = 11{,}4$ cm nötig, um ein scharfes Bild zu erzeugen, so korrigiert man die beobachtete Zahl der Quadrate im Verhältnis von $l^2 : l_1^2$, wenn l der abgelesene Abstand der Linse ist.

Weber weist darauf hin, daß man für vergleichende Messungen außer N noch die mit der Lage der Zimmer veränderliche Flächenhelle des Himmels und bei sehr kleinem N auch noch das diffuse Wandlicht berücksichtigen müsse.

§ 91. Interferenzphotometer von Lummer[1]).

Als photometrisches Kriterium werden die sogenannten *Herschelschen Interferenzstreifen* an der Grenze der totalen Reflexion verwendet, welche entstehen, wenn man durch einen Würfel $ABCD$ hindurchsieht, welcher aus zwei rechtwinkligen, aufeinandergelegten und durch eine sehr dünne Luftschicht voneinander getrennten Prismen gebildet wird (Fig. 72). Die durch die trennende Luftschicht durchgehenden und die an der Hypotenusenfläche reflektierten Strahlen erzeugen je ein Streifensystem, und zwar derart, daß bei homogenem Lichte die hellen Streifen des einen Systems auf die dunklen des anderen Systems, und bei gemischtem Lichte komplementär gefärbte Streifen aufeinander fallen. Sobald die beiden interferierenden Lichtströme gleich[2]) sind, erscheinen die Streifen, weil sie sich zu gleicher Helligkeit summieren, durch Übereinanderlagerung verschwunden. Im Grunde genommen wird

[1]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 3, 131 (1901).

[2]) Streng genommen gilt dies zunächst nur für die objektiven Lichtmengen, für die Lichtströme nur dann, wenn die beiden Lichtquellen genau gleich gefärbt sind.

also auch hier auf **gleiche Helligkeit** eingestellt. Dasselbe gilt für alle anderen Photometer, bei welchen auf Verschwinden von Interferenzstreifen eingestellt wird, z. B. für das Photometer von Wild (§ 98). Bei allen diesen Photometern gehen die Vergleichsfelder jedoch durch allmähliche Helligkeitsänderung ineinander über.

a) Messung von Lichtstärken. Man bringt, wie es schon Fuchs[1]) getan hat, vor den Würfel $ABCD$ die matten Scheiben G_1 und G_2 und stellt durch Verschieben von L_1 auf Verschwinden der Streifen ein. Man vergleicht so die von L_1 auf G_1 erzeugte Beleuchtung mit der von L_2 auf G_2 erzeugten.

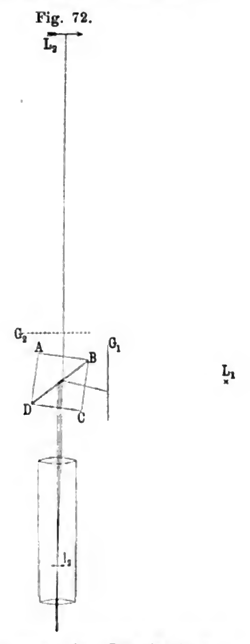


Fig. 72.

b) Verteilung der Flächenhelle auf einer leuchtenden Scheibe. Man nimmt G_2 fort, so daß man durch den Würfel direkt auf die zu messende leuchtende Fläche L_2 blickt. Die auf dieser Fläche liegenden Interferenzstreifen bringt man wiederum zum Verschwinden durch Verschiebung von L_1. Ist die Flächenhelle von L_2 überall gleich, so verschwinden alle Streifen zugleich. Ändert sich die Flächenhelle von Ort zu Ort stark, so werden immer nur einige Streifen ausgelöscht. Man kann so die Flächenhelle sehr benachbarter Stellen vergleichen und leicht feststellen, wie die Flächenhelle auf einer Lampenglocke, auf einer Wolke, längs eines glühenden Platinblechs von Stelle zu Stelle wechselt.

Hierher gehören, streng genommen, auch noch die Interferenzphotometer von Babinet und Wild (vierte Form), weil auch bei ihnen die photometrische Einstellung durch Abstandsänderungen erfolgt. Wir werden sie jedoch erst in § 98 unter den Polarisationsphotometern beschreiben, weil wir es bei beiden mit Polarisationserscheinungen zu tun haben.

§ 92. Photometer von Wheatstone, Masson und Pagliani.

Die drei folgenden Photometer gründen sich auf die Dauer des Lichteindruckes (S. 206).

[1]) Wied. Ann. 11, 465 (1880).

Photometer von Wheatstone[1]). Auf eine glänzende Metallkugel *a* (Fig. 73 a), welche durch Drehen der Kurbel *e* mittels passender Zahnradverbindungen in Epicycloiden bewegt wird, läßt man die Strahlen der beiden Lichtquellen fallen. Man sieht zwei helle Epicycloiden (Fig. 73 b) und verändert den Abstand der Kugel von den beiden Lichtquellen so lange, bis die Kurven gleich hell erscheinen.

Fig. 73 a.

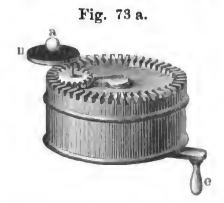
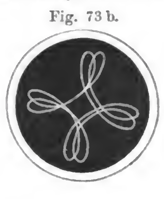


Fig. 73 b.



Photometer von Masson[2]). Masson verwendet zu Lichtstärkenmessungen von Blitzen und elektrischen Funken eine schnell rotierende Scheibe mit abwechselnd schwarzen und weißen Kreisausschnitten. Bei einer andauernden Beleuchtung erscheint die Scheibe gleichmäßig grau; dagegen sieht man bei einer augenblicklichen hinreichend starken Beleuchtung die Kreisausschnitte schwarz und weiß, wie wenn die Scheibe still steht. Wenn man beide Beleuchtungen gleichzeitig wirken läßt, bleiben die Sektoren im allgemeinen sichtbar. Entfernt man die rotierende Scheibe allmählich von der augenblicklich wirkenden Lichtquelle, so wird bei einer gewissen Entfernung der Helligkeitsunterschied zwischen den aufeinander folgenden Sektoren zu gering, um noch wahrgenommen werden zu können (vgl. S. 155), und die Scheibe erscheint wieder gleichmäßig grau. Bei der photometrischen Messung bringt man unter Benutzung einer andauernden Lichtquelle die Scheibe nacheinander in solche Entfernungen r_1 und r_2 von den beiden zu vergleichenden, augenblicklich wirkenden Lichtquellen L_1 und L_2, daß die Sektoren verschwinden; alsdann ist das Verhältnis J_2/J_1 gleich r_2^2/r_1^2.

Photometer von Pagliani[3]). Eine von konzentrischen Ringen bedeckte glänzende Metallscheibe wird durch die beiden zu vergleichenden Lichtquellen beleuchtet. Man erhält dann zwei helle Sektorensysteme und ändert die Lage der Scheibe, bis beide gleich hell erscheinen.

---

[1]) Engineering 35, 75 (1883).
[2]) C. R. 18, 289 (1844); Pogg. Ann. 63, 158 (1844).
[3]) Ingegneria Civile 13, 13 (1887); Beibl. 11, 820 (1887).

C. Schwächung durch andere Mittel als durch Entfernungsänderung.

§ 93. Das Schwächungsgesetz ist ebenfalls physikalischer Natur.

a) Anwendung des $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Gesetzes.

Nach dem als $\cos i$-Gesetz bezeichneten Grundgesetz ist die auf einem Flächenelement erzeugte Beleuchtung proportional dem Kosinus des Einfallswinkels i [Gleichung 8), S. 75]. Dagegen ist die Flächenhelle, die das Element durch diese Beleuchtung unter einem beliebigen Ausstrahlungswinkel ε erlangt, nur bei wenigen Substanzen, die wir orthotrope nannten (S. 79 und 88), und auch bei diesen nur innerhalb gewisser Grenzen, proportional $\cos i$ (S. 85 bis 88). Durch meßbare Änderung von i kann man demnach die Beleuchtung stets, dagegen die Flächenhelle nur in Ausnahmefällen meßbar ändern. Diese Methode der Lichtschwächung ist also im allgemeinen wenig genau und findet deshalb nur bei wenigen Photometern (vgl. § 95 u. 137) Verwendung

b) Anwendung von Blenden.

Es möge bezeichnen:

- G eine ebene, derartig diffus leuchtende Fläche, daß alle Elemente in den in Betracht kommenden Richtungen die gleiche Flächenhelle e besitzen;
- D eine Blende mit der meßbar verstellbaren Öffnung f;
- P einen Photometerschirm, auf welchen die Strahlen möglichst senkrecht auffallen sollen;
- d die hinlänglich große Entfernung zwischen f und P.

In Betracht kommen hier vorzugsweise folgende Methoden:

Methode 1. Man stellt den Schirm P (Fig. 74) so auf, daß seine Mitte in der Mittelsenkrechten von G liegt, und schaltet zwischen G und P und zwar möglichst nahe an G und parallel zu G eine verstellbare Blende D. Alsdann ist nach Gleichung 1a), S. 94, die auf P erzeugte Beleuchtung

Fig. 74.

G D P d

$$E = \frac{e f}{d^2} \cos i,$$

wenn i der Einfallswinkel der Strahlen ist, die von der Mitte von G auf die Mitte von P gesandt werden. Durch Änderung von f kann also E meßbar verändert werden.

Methode 2 (Bouguer). Man stellt G symmetrisch zur optischen Achse einer Linse C auf und bildet G mittels dieser Linse C, vor welcher sich D befindet, scharf auf P ab. Alsdann ist die auf P,

also an dem Orte des objektiv aufgefangenen Bildes von G, erzeugte Beleuchtung wieder proportional f.

Denn Blende und Linse wirken zusammen so, als ob f in den in Betracht kommenden Richtungen mit der Flächenhelle $D \cdot e$ (Anhang 4, 6) leuchtet, wo D das Durchlässigkeitsvermögen der Linse für die wirksamen Strahlen bezeichnet; mithin ist

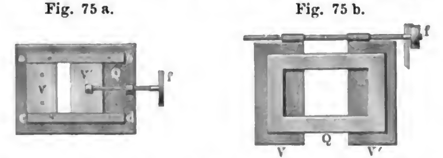
$$E = \frac{Def}{d^2}.$$

Methode 3 (Cornu). Man fängt das von der Linse (Objektiv) C erzeugte Bild von G in Luft auf und betrachtet es mit einer Lupe. Ist das Bild, welches die Lupe von der Objektivöffnung entwirft, der sogenannte Okularkreis, kleiner als der Durchmesser der Augenpupille, so ist die Bildhelligkeit ebenfalls proportional f (Anhang 4, 5).

Gestalt der Blenden.

Die verstellbaren Blenden können jede beliebige Gestalt haben, z. B. die eines Rechteckes oder Quadrates (Katzenauge), Kreises (Iris-

Fig. 75 a. Fig. 75 b.



blende), Sektors. Fig. 75 a und b zeigen zwei rechteckige Blenden von konstanter Höhe, aber veränderlicher Breite. Bei der ersteren liegt auf der Grundplatte Q zwischen den Schienen ab und cd eine Platte V fest auf, während sich zwischen den Schienen die Platte V' mittels einer Mikrometerschraube f meßbar verschieben läßt. Bei der Blende Fig. 75 b werden V und V' hinter Q mittels der Mikrometerschraube f gleichzeitig um den gleichen Betrag genähert oder entfernt, so daß die Blendenmitte stets an derselben Stelle bleibt (bilaterale Verschiebung). Rechteckige Blenden von geringer Breite, sog. *Spalte*, besonders verstellbare, werden bei Spektralphotometern verwandt (vgl. z. B. § 117).

In den meisten Fällen (Crova, Mascart, Blondel und Broca, § 96 und 97) benutzt man als gleichmäßig leuchtende Fläche G die Rückseite einer durchleuchteten, durchscheinenden Platte. Diese Anordnung ist nicht einwandfrei, weil die Flächenhelle e solcher Platten unter verschiedenen Ausstrahlungswinkeln ε im allgemeinen nicht konstant, sondern nach S. 88 proportional $\cos^n \varepsilon$ ist, wo n zwischen 0 und 1 liegt. Um einigermaßen zuverlässige Werte zu erhalten, muß man dann dafür sorgen, daß die Strahlen möglichst senkrecht von G ausgehen.

c) Anwendung von Zerstreuungslinsen.

Man schaltet zwischen L (Fig. 76) und dem Photometerschirm P eine Zerstreuungslinse Z ein. Ist r der Abstand zwischen L und P, d der Abstand zwischen der Linsenmitte und P, ferner p der absolute Wert der Brennweite von Z, so ist die durchschnittliche Beleuchtung auf P

ohne Linse $$E = \frac{J}{r^2},$$

mit Linse $$E' = \frac{J}{r^2} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{d}{p} - \frac{d^2}{rp}} \right)^2.$$

Hierbei ist nicht der Lichtverlust durch Reflexion und Absorption berücksichtigt; derselbe ist entweder durch einen besonderen Versuch zu bestimmen oder nach Voller[1]) durch Einschalten planparalleler Platten in den Strahlengang der anderen Lampe zu kompensieren.

Fig. 76.

Zerstreuungslinsen wurden von Perry und Ayrton[2]) bei ihrem Dispersionsphotometer, sowie von Hopkins angewandt; sie sind heute nur noch selten im Gebrauch.

d) Anwendung von absorbierenden Mitteln.

In Betracht kommen:

1. Durchscheinende weiße Platten (Milch-, Opal-, Albatringlas, weniger gut Mattglas), welche als Photometerschirme benutzt werden, und von denen man je nach der Stärke der zu messenden Lichtstärken oder Beleuchtungen eine oder mehrere benutzt; von solchen Platten macht, wie wir auf S. 186 sahen, Weber bei seinem Milchglasplattenphotometer Gebrauch.

2. Rauchglasplatten, welche man senkrecht zu den Lichtstrahlen stellt; je nach Bedarf wendet man wieder eine oder mehrere an. Streng genommen hat man hierbei zu berücksichtigen, daß durch Strahlenbrechung die Lichtquelle den Photometerschirm scheinbar um die Größe $\frac{n-1}{n} d$ (also für $n = 1{,}5$ um $\frac{1}{3} d$) genähert wird, wenn n der Brechungsexponent und d die Dicke der Platte ist. Ist also der Abstand zwischen L und P gleich r, so ist die Beleuchtung auf P gleich

$$D \cdot \frac{J}{\left(r - \frac{n-1}{n} d\right)^2},$$

[1]) Abh. d. Naturw. Vereins Hamburg **7** (2), 40 (1883).
[2]) Phil. Mag. (5) **9**, 117 (1880); (5) **14**, 45 (1882).

wenn D das Durchlässigkeitsvermögen der Platte für die Strahlen von L bezeichnet.

3. Keile aus Rauchglas. Durch Platten läßt sich das Licht nur sprungweise ändern. Um eine kontinuierliche Schwächung zu erhalten, verwenden Pritchard und Pickering [1]) einen Rauchglaskeil, Sabine [2]) ebenfalls einen Rauchglaskeil, an welchem er zur Vermeidung der Brechung einen Keil aus farblosem Glase mittels Kanadabalsams so angekittet hat, daß die äußeren Begrenzungsflächen parallel sind. Den hierbei auftretenden Übelstand, daß die Strahlen an den verschiedenen Stellen des Querschnittes ungleich geschwächt werden und hierdurch den Photometerschirm ungleich beleuchten, vermeidet Spitta [3]), indem er zwei Rauchglaskeile A und B (Fig. 77) längs ihrer Hypotenusenflächen verschiebt und so eine Platte erhält, deren Dicke veränderlich ist, je nachdem die Platten mehr oder weniger übereinander geschoben werden. Diese Verschiebung geschieht mittels einer Mikrometerschraube, an welcher die Veränderung der Dicke der Platten genau abgelesen werden kann. Der Doppelkeil wird empirisch für verschiedene Dicken geeicht.

Fig. 77.

B A

Diese aufgeführten Substanzen sind wegen ihrer auswählenden Absorption mit Vorsicht zu gebrauchen. Für jede Lichtart sollte man deshalb durch einen besonderen Vorversuch das Durchlässigkeitsvermögen bestimmen. Absorbierende Flüssigkeiten, wie sie Hähnlein [4]) empfiehlt, sind für die vorliegenden Zwecke ungeeignet.

e) Anwendung der Polarisation.

1. Erzeugung von geradlinig polarisiertem Lichte (vgl. Anhang 3).

Durch Reflexion und Brechung. Läßt man ein natürliches Strahlenbündel unter einem beliebigen Winkel auf eine einzelne Glasplatte [5]) oder besser auf eine Reihe paralleler Glasplatten (Glasplattensatz) fallen, so ist sowohl das reflektierte als auch das durchgelassene Bündel teilweise geradlinig polarisiert. Nur wenn die von der Vorderfläche der ersten Platte reflektierten und die an ihr gebrochenen Strahlen aufeinander senkrecht stehen, sind die reflektierten Strahlen vollständig polarisiert (Gesetz von Brewster). Bezeichnet in diesem Falle α den Einfallswinkel auf die Vorderfläche (Polarisationswinkel),

[1]) Proc. Amer. Acad. **17**, 231 (1881/82); **18**, 15 (1882/83).
[2]) Phil. Mag. (5) **15**, 22 (1883).
[3]) Proc. Roy. Soc. **47**, 15 (1889).
[4]) D. R.-P. 13216 (1880); J. f. G. u. W. **24**, 659 (1881).
[5]) Gewöhnlich schwärzt man eine einzelne Glasplatte an der Hinterseite, damit von hinten kein Licht kommen kann und die Erscheinung stört.

$\beta = 90 - \alpha$ den zugehörigen Brechungswinkel, n den Brechungsexponenten, so ist $\sin\alpha = n\cos\alpha$, demnach

$$tg\,\alpha = n.$$

Für Glas ($n = 1{,}5$) ist der Polarisationswinkel gleich 56°. Unter diesem Winkel werden von der erwähnten Vorderfläche 7,4, von einer Glasplatte 12,9, von zwei 20,5, von zwanzig 43,7 Proz. des auffallenden Lichtes reflektiert [1]). Die reflektierte Lichtmenge wächst also mit der Anzahl der Platten. Nach der Annahme von Fresnel, welche wir, wie bereits S. 40 erwähnt wurde, stets zugrunde legen wollen, schwingen die unter dem Polarisationswinkel reflektierten Strahlen senkrecht zur Einfallsebene.

Das durch den Glasplattensatz durchgehende Strahlenbündel ist, selbst wenn die Strahlen unter dem Polarisationswinkel auffallen, nur teilweise polarisiert, d. h. es besteht aus einem natürlichen und einem geradlinig polarisierten Bündel. Die polarisierte Lichtmenge (der sichtbare Energiestrom) schwingt in der Einfallsebene und ist, wie es das Gesetz von Arago verlangt, gleich der polarisierten Lichtmenge im reflektierten Bündel. Das Verhältnis zwischen der polarisierten und gesamten Lichtmenge des durchgelassenen Bündels wächst also ebenfalls mit der Anzahl der Glasplatten. Für 20 Glasplatten ist das Verhältnis nach obigem 43,7/56,3 = 0,78; der sog. Prozentgehalt des polarisierten Lichtes beträgt hier also 78 Proz., ist mithin noch beträchtlich von 100 Proz. entfernt.

Durch Doppelbrechung. Am meisten wird zu diesem Zwecke Kalkspat benutzt. Derselbe besitzt bekanntlich eine kristallographische Hauptachse. In optischer Beziehung wird diejenige Ebene als Hauptschnitt bezeichnet, welche durch das Einfallslot des eintretenden Lichtstrahles und die optische Achse gelegt ist.

Läßt man ein natürliches Bündel unter einem beliebigen Winkel auf ein Kalkspatkristall fallen, so zerfällt es in demselben in zwei gleich starke, vollständig polarisierte Bündel, von denen das eine, das ordentliche, das Snelliussche Brechungsgesetz (S. 17) befolgt, während das andere, das außerordentliche, nach einem weniger einfachen Gesetze gebrochen wird. Fallen die Strahlen speziell im Hauptschnitt ein, so schwingen die ordentlichen senkrecht zum Hauptschnitt, die außerordentlichen im Hauptschnitt. Beim Nicolschen und dem weit kürzeren Foucaultschen Prisma werden nur die außerordentlichen Strahlen durchgelassen, die ordentlichen durch Totalreflexion beseitigt; abgesehen von Verlusten durch Reflexion und Absorption ist also die durchgelassene Lichtmenge die Hälfte der auffallenden.

2. Schwächungsgesetz.

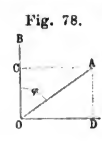
Läßt man die Lichtmenge G eines parallelen, geradlinig polarisierten, homogenen Strahlenbündels auf einen doppeltbrechenden Kristall auf-

[1]) Vom Verlust durch Absorption im Glase werde hierbei abgesehen.

fallen, und bildet die Schwingungsrichtung des Lichtes mit dem Hauptschnitt des Kristalles den Winkel φ, so wird im ordentlichen Strahlenbündel die Lichtmenge $D_o\, G \sin^2 \varphi$ und im außerordentlichen Strahlenbündel die Lichtmenge $D_e\, G \cos^2 \varphi$ durchgelassen, wenn D_o und D_e die Durchlässigkeitsvermögen des Kristalles für die ordentlichen und außerordentlichen Strahlen sind. (Erweitertes Gesetz von Malus.)

Denn ist OA (Fig. 78) die Amplitude und Schwingungsrichtung des auf den Kristall fallenden Lichtes und OB die Richtung des Hauptschnittes, so können wir OA ähnlich wie eine Kraft in zwei Komponenten $OD = OA \cdot \sin \varphi$ und $OC = OA \cdot \cos \varphi$ zerlegen, von denen die erstere senkrecht zum Hauptschnitt, die andere im Hauptschnitt liegt. Nun ist die Lichtmenge dem Quadrate der Amplitude proportional (S. 15). Mithin können wir die auffallende Lichtmenge G in die beiden aufeinander senkrecht stehenden Komponenten $G \sin^2 \varphi$ und $G \cos^2 \varphi$ zerlegen, von denen die erstere senkrecht zum Hauptschnitt, die zweite im Hauptschnitt schwingt. Infolge von Reflexions- und Absorptionsverlusten wird von der ersteren nur der Bruchteil D_o, von der zweiten nur der Bruchteil D_e durchgelassen.

Fig. 78.



Ein Nicol läßt nur die im Hauptschnitt schwingende Komponente durch; für ihn ist also $D_o = o$. Stellt man demnach zwei Nicols so hintereinander auf, daß ihre Längsrichtungen zusammenfallen, und läßt die Menge G eines natürlichen, homogenen Strahlenbündels in Richtung der gemeinsamen Längsachse (oder nahezu in dieser Richtung) auf das System auffallen, so geht durch das erste Nicol ein gewisser Bruchteil hindurch, der in dem Hauptschnitte desselben schwingt, und von diesem geht wieder ein $\cos^2 \varphi$ proportionaler Bruchteil durch das zweite Nicol, wenn φ der Winkel ist, den die beiden Hauptschnitte miteinander bilden. Mithin läßt das System die Lichtmenge $D\, G \cos^2 \varphi$ hindurch, wenn D das Durchlässigkeitsvermögen der beiden Nicols für $\varphi = o$ ist.

Was von der (objektiven) Lichtmenge gilt, behält auch für den ihr proportionalen physiologischen Wert, den Lichtstrom, seine Gültigkeit. Handelt es sich um einen gemischten Lichtstrom, so sind die Größen D_e, D_o, D natürlich die Durchlässigkeitsvermögen für den gemischten Lichtstrom.

Sieht man also durch zwei Nicols hindurch nach einer kleinen, in natürlichem Lichte leuchtenden Fläche, und ist h die Helligkeit ohne die beiden Nicols, so ist die Helligkeit gleich $D h \cos^2 \varphi$, wenn die Hauptschnitte den Winkel φ miteinander bilden. Durch Drehen des zweiten Nicols kann also die Helligkeit *meßbar* geschwächt werden.

Dieses Lichtschwächungsverfahren mittels zweier Nicols oder ähnlicher polarisierender Vorrichtungen ist ohne weiteres für vollständig unpolarisiertes Licht gültig. Ist das Licht dagegen teilweise polari-

siert, so muß man den polarisierten und unpolarisierten Anteil in Rechnung ziehen oder das Licht depolarisieren, z. B. indem man es durch eine mattgeschliffene Milchglasplatte (weniger gut durch eine Mattglasplatte) hindurchgehen oder auf einen Gipsschirm fallen läßt.

Ein Hauptübelstand der Schwächung durch polarisierende Mittel ist, daß man es infolge der hierbei auftretenden starken Lichtverluste mit geringer Helligkeit des Gesichtsfeldes zu tun hat.

§ 94. Das Schwächungsgesetz ist physiologischer Natur.

a) Talbots Gesetz.

Läßt man eine Scheibe A mit abwechselnd schwarzen und weißen Sektoren um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Achse langsam rotieren, so kann man die einzelnen Sektoren noch ganz deutlich, wenn auch mit schwach verwaschener Grenze, unterscheiden. Steigert man die Geschwindigkeit allmählich, so sind die Sektoren bald nicht mehr voneinander zu unterscheiden und man hat die Empfindung des *Flimmerns.* Wird die Geschwindigkeit noch mehr vergrößert, so wird das Flimmern immer schwächer und hört schließlich ganz auf; die Scheibe erscheint jetzt an allen Stellen gleichmäßig leuchtend.

Wenn man zwischen eine gleichmäßig leuchtende Scheibe B und das Auge eine undurchsichtige Scheibe C mit gleich weit voneinander abstehenden sektorenförmigen Ausschnitten einschaltet und C in hinreichend schnelle Drehung versetzt, so erscheint B wieder gleichmäßig leuchtend.

Die beiden Beispiele zeigen, daß schnell wiederholte Lichteindrücke ähnlicher Art auf das Auge denselben Eindruck wie ein *kontinuierliches Licht* hervorbringen. Die Stärke dieses kontinuierlichen Lichtes ist durch das Talbotsche Gesetz[1]) bestimmt, welchem Helmholtz[2]) folgende Fassung gibt: „Wenn eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem und regelmäßig in derselben Weise wiederkehrendem Lichte getroffen wird, und die Dauer der Periode hinreichend kurz ist, so entsteht ein kontinuierlicher Lichteindruck, der dem gleich ist, welcher entstehen würde, wenn das während einer jeden Periode eintreffende Licht gleichmäßig über die ganze Dauer der Periode verteilt würde.“

Nach diesem Gesetze erscheinen die erwähnten beiden Scheiben A und B in der Helligkeit

$$\frac{f}{360}\,h,$$

wenn h die Helligkeit der weißen Sektoren von A bzw. die Helligkeit

[1]) Phil. Mag. (3) 5, 321 (1834).

[2]) Physiol. Optik, zweite Auflage, S. 483.

von B und f die Gesamtgröße der Sektorausschnitte in Bogengraden sind.

Die Stärke des intermittierenden Lichtes ist also f proportional. Ist beispielsweise $f = 30^0$, so beträgt der Schwächungsfaktor $^1/_{12}$.

Da die früheren Prüfungen des Gesetzes durch Plateau, v. Helmholtz, Brücke, Fick, Aubert, Kleiner, E. Wiedemann und Messerschmitt wegen zu großer Beobachtungsfehler zu ungenau waren, haben Lummer und Brodhun [1]) eine erneute Prüfung vorgenommen, bei der sie sich elektrischer Glühlampen bedienten. Dabei ergab sich, daß die Stärke des intermittierenden Lichtes innerhalb der untersuchten Grenzen (27 bis 200 Unterbrechungen der Lichtausstrahlung in der Sekunde) von der Rotationsgeschwindigkeit unabhängig ist, und daß das Talbotsche Gesetz mit der Genauigkeit gilt, mit der man photometrische Messungen ausführen kann.

Daß intermittierende Lichteindrücke ähnlicher Art einen kontinuierlichen Eindruck hervorbringen können, kommt daher, daß eine Lichtempfindung infolge der Trägheit der Nervensubstanz nicht gleichzeitig mit dem Reiz verschwindet. Die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Eindrücken, die Periode des Wechsels, muß nämlich kürzer sein als die Dauer des Lichteindruckes, d. h. als die Zeit, während welcher die Nachwirkung eines jeden Eindruckes noch nicht merklich nachgelassen hat.

Die Zahl der Intermittenzen, welche notwendig [2]) sind, damit das Flimmern im Auge aufhört, muß um so größer sein, je stärker die Lichtstrahlung ist. Nach Helmholtz beträgt diese Zahl bei starkem Lampenlicht, welches eine Scheibe mit einem schwarzen und einem weißen Sektor beleuchtet, 24, bei Vollmondlicht nur 10 in der Sekunde; Brücke findet 17,6, Aubert 20,3; Kleiner erhält für die stärkste von ihm benutzte Beleuchtung etwa 40. Für eine mittlere Beleuchtungsstärke auf dem Photometerschirme von etwa 10 Lux genügen nach Lummer und Brodhun 30 Unterbrechungen in der Sekunde.

b) Rotierender Sektor.

Durch den rotierenden Sektor ist ein vorzüglicher Ersatz für die bisher genannten Mittel zur meßbaren Schwächung des Lichtes geschaffen, da das Schwächungsgesetz ein sehr einfaches ist, da der Apparat an jeder beliebigen Stelle in den Strahlengang gebracht werden kann, und da der Polarisationszustand und die spektrale Zusammensetzung des benutzten Lichtes keinerlei Rolle spielen.

---

[1]) Z. f. Instrk. 16, 299 (1896). Hier findet man auch einen ausführlichen Literaturnachweis über die bisherigen Prüfungen.

[2]) Einen ausführlichen Literaturnachweis über diese Prüfungen findet man ebenfalls in Z. f. Instrk. 16, 299 (1896).

Rotierende Sektoren wurden schon von Talbot[1]), Babinet und Secchi[2]) sowie Aubert[3]) angewandt, und auch Guthrie[4]), Napoli[5]) sowie Hammerl[6]) haben sich derselben bedient. Fig. 79 zeigt den von dem letztgenannten Physiker benutzten Apparat. Derselbe besteht aus zwei konzentrischen Kreisscheiben, welche auf einer gemeinsamen Achse sitzen und mit je drei Ausschnitten versehen sind. Die Ausschnitte lassen sich gegeneinander verschieben, so daß man jeden Winkel von 0 bis 180° herstellen kann. Auf der einen Scheibe ist eine Teilung angebracht, welche direkt durch einen Ausschnitt der anderen Scheibe *a* die Summe der Sektoren, ausgedrückt in Bogengraden, abzulesen gestattet.

Die Sektoren werden in der Praxis gewöhnlich zwischen der zu messenden starken Lichtquelle L und dem Photometerschirm möglichst nahe dem letzteren senkrecht zu den Strahlen so aufgestellt, daß von L aus der ganze Photometerschirm bei der Rotation sichtbar ist. Die eben erwähnte Anordnung ist nur für Lichtquellen mit intermittierendem Lichte, z. B. eine Wechselstrombogenlampe, unanwendbar. In solchen Fällen kann man sich dadurch helfen, daß man den Sektor in den Strahlengang der mit L zu vergleichenden Lichtquelle bringt.

Fig. 79.

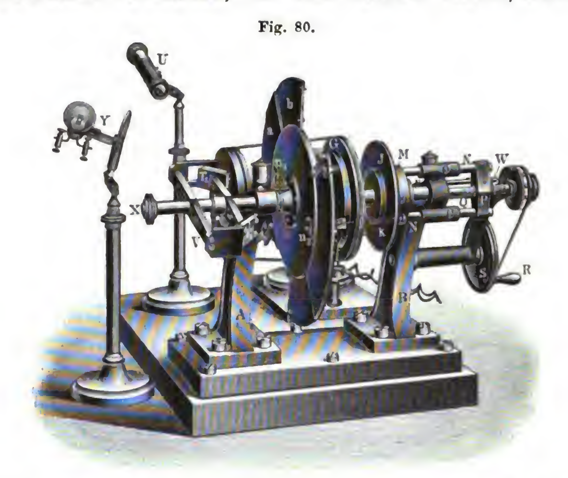
Bei den älteren Sektorenapparaten ließen sich die Scheiben nur in der Ruhelage gegeneinander verschieben, so daß man keine kontinuierliche Lichtschwächung vornehmen konnte. Bei den neueren Apparaten läßt sich die Verschiebung während der Rotation ausführen. Solche Anordnungen sind von Abney und Festing[7]), A. König[8]), Marbe[9]), Lummer und Brodhun[10]) und jüngst von Brodhun[11]) angegeben.

Fig. 80 (a. f. S.) zeigt den Sektor von Brodhun. In den Lagern A und B ruht die Drehungsachse, welche die beiden Sektorenscheiben a und b trägt. Von diesen ist die nach X hin liegende Scheibe a an der Drehungsachse fest, während b gegen a *verschiebbar* ist. Auf der

[1]) Pogg. Ann. 35, 457 (1835); Phil. Mag. (3) 5, 327 (1834).
[2]) Arch. Soc. Phys. de Genève 20, 121.
[3]) Physiol. der Netzhaut, S. 30, 34, 283.
[4]) Chem. News. 40, 262 (1879).
[5]) Séances de la Soc. de phys franç. 1880.
[6]) E. T. Z. 4, 262 (1883).
[7]) Proc. Roy. Soc. 43, 247 (1887/88).
[8]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 10, 68 (1891).
[9]) Physiol. Zentralblatt Nr 25, 1894. D. R.-P. Nr. 78 693.
[10]) Z. f. Instrk. 16, 305 (1896).
[11]) Ebenda 24, 313 (1904).

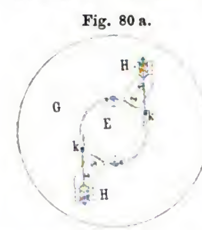
Drehungsachse sind ferner die Kettenscheibe J und die mittels eines Elektromotors angetriebene Schnurscheibe G befestigt. Die Verschiebung von b gegen a wird mittels zweier Ketten k (wie beim Marbeschen Farbenkreisel) und einer Stahlfeder bewirkt; früher

Fig. 80.



bedienten sich Lummer und Brodhun einer Schnecke zur Verschiebung. Die Ketten k gehen von J parallel zur Drehungsachse über zwei an G befindliche Rollen H (s. Fig. 80 a), darauf senkrecht zur Drehungsachse weiter und wickeln sich an dem Umfang einer mit b fest verbundenen Trommel E auf. Die Stahlfeder, deren ein Ende an E und deren anderes Ende an a befestigt ist, hat das Bestreben, den Sektor zu schließen. Dreht man die Schraube Q in die Mutter P hinein, so entfernt sich J von b; hierdurch wird das auf E aufliegende Stück der Kette verkürzt und der Sektor geöffnet. Schraubt man umgekehrt Q aus P heraus, so wird J durch die Stahlfeder an b herangezogen und der Sektor entsprechend geschlossen. Um schnell die Sektorenweite zu ändern, kann man sich der Kurbel R an der großen Schnurscheibe S bedienen, die mit der kleineren an Q verbunden ist. Bei kleineren Winkeln stellt man mittels des geränderten Kopfes der Schraube Q ein.

Fig. 80 a.



Ferner hat **Brodhun** zwei Vorrichtungen konstruiert, welche die Größe des Sektors während der Rotation abzulesen gestatten. Ein solches Ableseverfahren ist für genauere Messungen nötig, weil sich die beiden Scheiben während des Anhaltens gegeneinander verschieben können, wodurch man einen anderen Winkel ablesen würde als man eingestellt hat; ferner wird hierdurch bedeutend an Zeit gespart. Bei der ersten [1]) der beiden Ablesevorrichtungen werden zwei Zylinderlinsen benutzt, von denen die eine mit den Sektoren rotiert, die andere an dem Beobachtungsfernrohr befestigt ist. Solange die bewegliche Linse in der Nähe der festen ist, wirken beide wie ein Prisma mit veränderlichem Keilwinkel. Hierdurch läßt sich erreichen, daß das durch ein Reflexionsprisma parallel zur Umdrehungsachse erzeugte virtuelle Bild des Nonius, solange es im Fernrohr gesehen wird, absolut still steht, wie schnell auch die Rotation vor sich geht.

Die zweite Ablesevorrichtung ist aus Fig. 80 ersichtlich. Die beiden einander diametral gegenüberliegenden Metallspiegel T_1 und T_2, welche mit den Sektoren rotieren, bilden die ihnen gegenüberliegenden Nonien n_1 und n_2 in der Rotationsachse ab. Visiert man also mit dem Fernrohre U, welches senkrecht zu dieser Achse steht, durch einen der Spiegel hindurch auf die Achse, so sieht man den einen Nonius deutlich. Drehen sich die Sektorenscheiben etwas, so dreht sich auch das Noniusbild ein wenig um die Achse, solange es im Fernrohre sichtbar ist. Da aber wegen der Kleinheit des Spiegels diese Drehung nur sehr gering ist, so ändert das Bild seine Lage dadurch kaum merklich. Bei mäßig schneller Rotation wird es daher abwechselnd erscheinen und verschwinden, je nachdem der betreffende Spiegel im Gesichtsfelde des Fernrohres ist oder nicht. Bei schneller Rotation erhält man also ein kontinuierliches Bild des Nonius, falls dieser ausreichend hell beleuchtet ist, was durch die Glühlampe Y und eine Beleuchtungslinse geschieht, und falls das Gesichtsfeld dunkel ist, solange der betreffende Spiegel nicht darin ist. Deshalb muß der zweite Spiegel, welcher den anderen Nonius trägt, abgeblendet werden. Dies geschieht mittels des zwei Blenden tragenden Armes V. Je nachdem V mehr oder weniger den Sektorenscheiben genähert wird, kann der eine oder der andere Nonius im Fernrohre beobachtet werden. Diese Einstellung der Blenden kann durch den leicht um die Achse drehbaren Griff X während der Rotation erfolgen. Die ganze Ablesevorrichtung ist mit einer Klemmschraube an dem freien linken Ende der Drehungsachse befestigt, kann also leicht entfernt werden.

c) Sektorenvorrichtung von Brodhun.

Die von der gleichmäßig diffus leuchtenden Fläche G (Fig. 81, a. f. S.) in der Richtung ab ausgehenden Strahlen werden durch das **Fresnel**-

[1]) Z. f. Instrk. **17**, 10 (1897).

sche Prisma 1 in die zu $a\,b$ parallele Richtung $c\,d$ abgelenkt und durch ein zweites Fresnelsches Prisma 2 wieder in die mit $a\,b$ zusammenfallende Richtung $e\,f$ zurückgeführt. Die beiden Prismen sind fest miteinander verbunden und werden um eine mit $a\,b$ zusammenfallende Achse A mittels eines Uhrwerks oder Elektromotors in schnelle Rotation versetzt. Zwischen den beiden Prismen ist ein nicht mit den Prismen rotierender Sektor S angebracht.

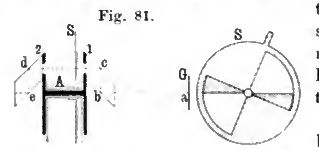


Fig. 81.

Während beim früher beschriebenen Apparate der Lichtstrahl stillstand, und der Sektor sich drehte, rotiert hier der Lichtstrahl auf einem Zylindermantel; dagegen nimmt der Sektor an der Rotation nicht teil. Bei der Messung wird die Größe des Sektors geändert. Die Stärke des intermittierenden Lichtes ist wieder der Sektorengröße proportional. Dieser Apparat hat vor denjenigen mit rotierenden Sektoren den Vorzug, daß er einfacher in der Konstruktion ist, sich leichter in den Strahlengang bringen läßt und eine **sehr schnelle Änderung** der Sektorengröße gestattet.

§ 95. Beleuchtungsmesser von Preece und Trotter, sowie von Wingen-Krüss.

Der Apparat von Preece und Trotter[1]) besteht aus einem innen geschwärzten Kasten (Fig. 82), welcher einen um a drehbaren weißen Schirm $a\,b$ und zwei elektrische Glühlampen L_n enthält, von denen die eine eine Lichtstärke von 1, die andere eine solche von 2 Kerzen hat. Die Mitten der beiden Lampen liegen auf einer zur horizontalen Umdrehungsachse a parallelen Geraden. In der oberen Kastenwand ist ein zweiter weißer Schirm angebracht, welcher bei e mit drei sternförmigen Öffnungen versehen ist und in die zu untersuchende Ebene gebracht wird. $a\,b$ wird so lange gedreht, bis das senkrecht auf $c\,d$ blickende Auge O durch e hindurch $a\,b$ so hell wie $c\,d$ sieht, also eine gleichmäßig

Fig. 82.

[1]) Electrician 35, 671 (1895); Engin. 60, 369 (1895); Z. f. Bel. 1, 343 (1895).

leuchtende Fläche erblickt. Ist dann i der Einfallswinkel der von L_n auf ab auffallenden Strahlen, so erscheint ab in einer Helligkeit, die nahezu proportional $\cos i$ ist. Mithin ist auch die Beleuchtung auf cd nahezu proportional $\cos i$.

Der Schirm ab liegt an seinem unteren Ende lose auf einem Vorsprung A eines Gelenkhebels BCD auf, dessen ein Ende sich um B dreht und dessen anderes Ende D drehbar in einer Hülse befestigt ist. Wenn man die Hülse auf der Stange EF verschiebt, kann man ab innerhalb gewisser Grenzen drehen. EF ist mit einer Teilung versehen, welche unmittelbar die Beleuchtung auf cd angibt, wenn nur die einkerzige Glühlampe eingeschaltet ist. Bei Benutzung der zweikerzigen Lampe bzw. beider Lampen sind die Zahlen der Teilung mit 2 bzw. 3 zu multiplizieren. Als Schirmmaterial wurde zunächst mit Magnesia bedecktes Blech, später aber, weil dieses leicht verschmutzt und nicht gereinigt werden kann, Bristolkarton benutzt, welcher durch Abwischen mit einem feuchten Leinentuch des Glanzes beraubt ist.

Mittels des Apparates kann man auch Lichtstärken messen. In diesem Falle läßt man die Strahlen der zu messenden Lampe L möglichst senkrecht auf den Schirm cd fallen und erhält $J = E \cdot r^2$, wenn E die abgelesene Beleuchtung und r der Abstand zwischen L und e ist.

Schon Arnoux[1]) benutzte die Drehung des Photometerschirmes zur Lichtschwächung.

In jüngster Zeit hat Wingen[2]) dasselbe Prinzip für einen neuen Helligkeitsprüfer verwertet. Krüss[3]) hat auch diesen Apparat wesentlich verbessert. Der so entstandene Beleuchtungsmesser stimmt in der äußeren Form mit dem auf S. 193 beschriebenen Wingen-Krüssschen Apparate überein, nur daß der Schirm c_1 etwas höher angeordnet und um eine horizontale Achse drehbar gemacht ist. Der Beobachter sieht auf die beiden scheinbar nebeneinander liegenden Schirme c_1 und c_2 oder durch eine Öffnung in c_1 auf den dahinter liegenden Schirm c_2. An einer teils rechnerisch, teils empirisch bestimmten Teilung kann die auf c_2 herrschende Beleuchtung unmittelbar abgelesen werden.

Wie beim Weberschen Photometer ist am Okularrohr ein Schieber angebracht, welcher eine freie Öffnung sowie eine rote und grüne Glasplatte enthält, so daß sich Beobachtungen im weißen, roten oder grünen Lichte ausführen lassen (vgl. § 108).

Eine große Genauigkeit ist bei allen diesen Apparaten nicht zu erwarten (vgl. § 93, a, S. 199).

§ 96. Ältere Diaphragmen-Photometer.

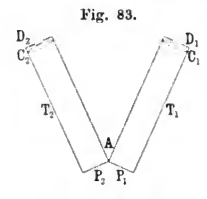
Vgl. § 93, b, S. 199 und 200. Ebenso wie dort sollen auch hier verstellbare Blenden mit D bzw. D_1 und D_2 bezeichnet werden.

[1]) Lum. électr. 23, 555 (1887).
[2]) D. R.-G.-M. Nr. 208 229.
[3]) J. f. G. u. W. 47, 917 (1904).

a) Das Heliometer von Bouguer.

Zwei gleich lange, um A drehbare Rohre T_1 und T_2 (Fig. 83) sind an dem einen Ende durch möglichst gleiche Objektive C_1 und C_2, am anderen Ende durch die durchscheinenden Papierschirme P_1 und P_2, die in der Brennebene C_1 und C_2 liegen, geschlossen. Die Rohre werden auf die zu vergleichenden Flächen gerichtet, deren Flächenhellen e_1 und e_2 seien. Die Objektive sind durch sektorenförmige Blenden D_1 und D_2 bedeckt, welche so lange verstellt werden, bis P_1 und P_2 gleich hell erscheinen. Sind f_1 und f_2 die sich ergebenden Blendenöffnungen, so ist

Fig. 83.



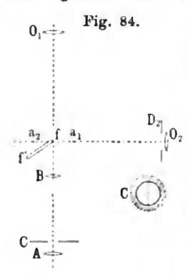
$$e_2 f_2 = e_1 f_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Auf diese Weise kann man die Flächenhelle eines Sternes mit der benachbarter Regionen des Himmels, ja selbst die Flächenhelle der Sonne mit der des Mondes vergleichen.

b) Photometer von Cornu[1]).

Das Objektiv O_1 (Fig. 84) erzeugt bei $f a_1$ ein Bild der einen der zu vergleichenden Flächen, während die andere Fläche durch das Objektiv O_2, dessen Achse auf der von O_1 senkrecht steht, und durch den gegen die Achse von O_1 um 45° geneigten Spiegel $f f'$ bei $f a_2$ abgebildet wird. Vor O_2 befindet sich die Blende D_2. Der Beobachter blickt durch das aus den beiden Linsen A und B bestehende Okular und sieht ein durch die nicht verstellbare Okularblende C begrenztes und durch das Bild der scharfen Kante f in zwei Teile geteiltes Gesichtsfeld; e_2 ist dann der sich bei der Einstellung ergebenden Blendenöffnung f_2 umgekehrt proportional. Das Photometer wurde von Le Chatelier für optische Temperaturmessungen benutzt (Anhang 6). Bei großen Unterschieden in den Flächenhellen muß man Rauchgläser zu Hilfe nehmen.

Fig. 84.



c) Photometer von Crova[2]).

Die Strahlen von L_1 und L_2 fallen nacheinander aus den Entfernungen r_1 und r_2 senkrecht auf eine durchscheinende Platte G, welche durch eine Blende D hindurch die eine Hälfte eines Foucaultschen Schirmes unter einem Einfallswinkel von 45° beleuchtet, während

---

[1]) J. de Phys. 10, 189 (1881).

[2]) C. R. 99, 1115 (1884); Ann. Chim. Phys. (6) 6, 342 (1885).

die andere Hälfte direkt von einer Vergleichslichtquelle L_a (Carcellampe) ebenfalls unter 45° beleuchtet wird. Ergeben sich nacheinander die Einstellungen f_1 und f_2, so ist

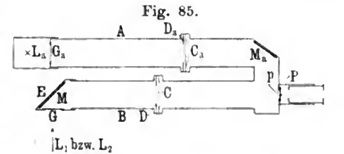
$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} \frac{f_1}{f_2} J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Denn die Beleuchtung des Schirmes durch L_a ist konstant; die Beleuchtungen durch L_1 und L_2 sind einander gleich und (nahezu) $t J_1 f_1/r_1^2$ bzw. $t J_2 f_2/r_2^2$, wo t der Durchlässigkeitskoeffizient von G für senkrechten Einfall und senkrechte Ausstrahlung ($i = \varepsilon = 0$) ist (S. 88).

d) Photometer von Mascart[1]).

Der Apparat besteht aus zwei horizontalen, durch ein Zwischenstück verbundenen Rohren A und B (Fig. 85) und kann um eine vertikale Achse gedreht werden. An B wird der rechtwinkelig gebogene, um die Achse von B drehbare Winkelkopf E angesetzt, welcher den gegen die Achse von B unter 45° geneigten Spiegel M enthält und durch die durchscheinende Platte G geschlossen ist. L_a beleuchtet den durchscheinenden Schirm G_a, welcher mittels der Linse C_a, vor welcher sich die Blende D_a befindet, auf der einen Hälfte des Foucaultschen Schirmes P abgebildet wird, nachdem die Strahlen mittels des Spiegels M_a und des Reflexionsprismas p reflektiert sind. L_1 und L_2 beleuchten nacheinander die Platte G aus den Entfernungen r_1 und r_2 senkrecht. Von G wird mittels des Spiegels M und der Linse C, vor welcher sich die Blende D befindet, ein Bild auf der anderen Hälfte des Schirmes P erzeugt.

Fig. 85.



Ergeben sich die Blendenöffnungen von D_a und D bei der Messung von L_1 zu f_1' und f_1, bei der Messung von L_2 zu f_2' und f_2, so ist

$$J_2 = \frac{f_1 f_2'}{f_1' f_2} \frac{r_2^2}{r_1^2} J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Mittels des Photometers lassen sich auch Beleuchtungen messen.

Schon Herschel[2]) und Steinheil[3]) bedienten sich bei ihren Sternphotometern zur Schwächung des Lichtes verstellbarer Blenden; die letzteren wurden auch von Fizeau und Foucault[4]) sowie von Simonoff[5]) angewandt.

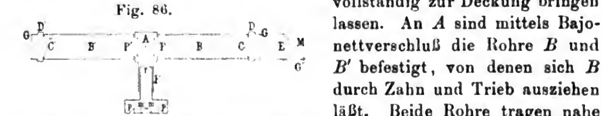
[1]) Bull. de la Soc. internat. des électr. 5, 103 (1883).
[2]) Herschel, On Light; Deutsch von J. C. Eduard Schmidt, Stuttgart und Tübingen, 1831.
[3]) Pogg. Ann. 34, 644 (1835).
[4]) Ann. Chim. Phys. (3) 11, 370 (1844); Pogg. Ann. 63, 463 (1844).
[5]) C. R. 97, 1055 (1883).

§ 97. Universalphotometer von Blondel und Broca[1]).

a) Beschreibung des Photometers.

Der mittlere Teil A (Fig. 86) stimmt im Prinzip mit dem Brückeschen Photometer (S. 183) überein; er enthält zwei oder vier übereinander liegende totalreflektierende Prismen, welche zusammen mit der Lupe r und den beiden Prismenpaaren mp und $m'p'$ die beiden Mattgläser P und P' gleichzeitig mit beiden Augen[2]) zu beobachten gestatten. Die vier kleinen Prismen zum binokularen Sehen sind mit dreifacher Regulierung versehen, wodurch sich die beiden Bilder vollständig zur Deckung bringen lassen. An A sind mittels Bajonettverschluß die Rohre B und B' befestigt, von denen sich B durch Zahn und Trieb ausziehen läßt. Beide Rohre tragen nahe ihrem Ende die Blendenbehälter D und D', in welche verstellbare rechteckige Blenden (Fig. 75 b, S. 200) eingeschoben werden können. Vor D und D' lassen sich die möglichst gleichen Linsen C und C' anbringen. Für gewöhnlich setzt man hinter D und D' die Albatrinschirme G und G', welche nach Blondel für Einfallswinkel bis zu 20° orthotrope Substanzen (S. 79) sind. Nach Bedarf läßt sich der Schirm G durch den um die Achse von B drehbaren Winkelkopf E mit dem Spiegel M und dem Albatrinschirm G'', ähnlich wie bei dem Photometer von Mascart, ersetzen.

Fig. 86.



b) Messung der Lichtstärke.

1. Man beleuchtet G' durch L_a, stellt L_1 und L_2 nacheinander in gleicher Entfernung vor G auf und macht durch Regulieren mittels der Blende D' die Einstellungen f_1' und f_2'. Alsdann ist

$$J_2 = \frac{f_2'}{f_1'} J_1 \qquad \qquad 1)$$

2. Oder man stellt L_1 und L_2 in gleichen Entfernungen von G' und G auf und reguliert mittels der Blende auf der Seite der stärkeren Lichtquelle. Oder man macht die Blenden gleich groß, setzt das Photometer auf eine Photometerbank und macht durch Abstandsänderung eine Einstellung. Schwache Lichtquellen werden nach der letzteren Methode verglichen, nachdem man die Rohre B und B' entfernt hat. Unsymmetrien werden in den drei letzteren Fällen durch Umlegen des Photometers und Mittelbildung eliminiert.

[1]) L'Eclair. électr. **8**, 52 (1895); **10**, 145 (1897).

[2]) Nach Broca [J. d. Phys. (3) **3**, 206 (1894)] gibt die binokulare Beobachtung eine größere Genauigkeit als die Beobachtung mit einem Auge.

c) Messung der Beleuchtung.

Methode 1. Man ersetzt G durch den Winkelkopf E und bringt, indem man E um die Achse des Rohres B dreht, den Schirm G'' in diejenige Fläche, deren Beleuchtung man zu messen wünscht. Man beleuchtet ferner G' durch L_a aus konstanter Entfernung und reguliert mittels der Blende D'. Alsdann ist die Beleuchtung auf G''

$$E = Cf', \qquad 2)$$

wo C eine Konstante ist.

Methode 2. Man entfernt den Schirm G'' vom Kopfe E, bringt einen weißen, diffus reflektierenden Schirm S in die zu untersuchende Fläche und visiert S mittels des Spiegels M an. Sodann zieht man das Rohr B so weit aus, bis S mittels der Linse C (ev. unter Zuhilfenahme einer Zerstreuungslinse) scharf auf P abgebildet wird, und macht die photometrische Einstellung f'. Es ergibt sich

$$E = C' d^2 f', \qquad 3)$$

wenn C' wieder eine Konstante und d den Abstand zwischen D und P bezeichnet.

C und C' werden mittels einer Normallampe bestimmt. Die Messungen sind also den Weberschen (S. 186 bis 188) ähnlich.

d) Die Messung der Flächenhelle

geschieht nach einer der Bouguerschen (S. 212) ähnlichen Methode.

Wegen anderer Messungen, die sich mit diesem Photometer ausführen lassen, muß auf die Originalabhandlung verwiesen werden.

§ 98. Ältere Polarisationsphotometer.

Von den älteren Photometern seien diejenigen von Bernard[1]), Beer[2]), Jamin[3]) und Becquerel[4]) nur erwähnt.

a) Photometer von Zöllner[5]).

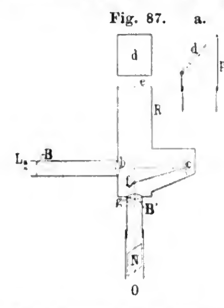
Methode 1. L_a (Petroleumlampe) (Fig. 87, a. f. S.) sendet durch die Blende B hindurch mittels Linse b und Silberspiegels c Strahlen unter dem Polarisationswinkel auf den Polarisationsspiegel f, von wo sie mittels der Linse g durch ein Nicol N hindurch als paralleles Strahlenbündel auf die Netzhaut des Auges o gelangen. L_1 und L_2 beleuchten nacheinander die Mattglasscheibe p senkrecht aus den Entfernungen

---

[1]) Ann. Chim. Phys. (3) **35**, 385 (1852).
[2]) Pogg. Ann. **84**, 37 (1851); **86**, 78 (1852).
[3]) Revue des Deux Mondes, février 1857.
[4]) La Lumière, Paris 1867, Bd. 1, S. 75.
[5]) Pogg. Ann. **100**, 381 (1857); **109**, 244 (1860).

r_1 und r_2 (s. Seitenansicht in Fig. 87 a); das von p ausgehende Licht fällt unter dem Polarisationswinkel auf den Polarisationsspiegel d und wird von diesem ebenfalls nach o geworfen. Die Einfallsebene von f liegt in der Zeichnungsebene, diejenige von d steht auf der Zeichnungsebene senkrecht; mithin schwingen die von L_a kommenden und von f reflektierten Strahlen senkrecht zur Zeichnungsebene, die von p kommenden und von d reflektierten Strahlen in der Zeichnungsebene. Das Auge o akkommodiert mittels g auf die scharfe Kante von f; es sieht dann ein kreisförmiges Gesichtsfeld, das durch das Diaphragma B' begrenzt und durch die Kante von f in zwei Hälften geteilt ist, welche durch senkrecht zueinander polarisierte Strahlen erleuchtet sind. Bei einer gewissen Stellung des Nicols N (Null- oder Dunkelstellung) erscheint das von L_a beleuchtete Gesichtsfeld dunkel. Sind φ_1 und φ_2 die Winkel, um welche man N bei der Messung von L_1 bzw. L_2 aus dieser Stellung drehen muß, bis beide Hälften gleich hell erscheinen, so ist

Fig. 87. a.



$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} \frac{tg^2\,\varphi_2}{tg^2\,\varphi_1} J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Beweis: Die Flächenhelle von p ist bei der Beleuchtung durch L_2 proportional J_2/r_2^2, demnach die Helligkeit des durch L_2 beleuchteten Feldes proportional $J_2 \cos^2\varphi_2/r_2^2$ oder gleich $c\,J_2 \cos^2\varphi_2/r_2^2$, wo c eine gewisse Konstante ist. Die Helligkeit des durch L_a beleuchteten Gesichtsfeldes ist $c' \sin^2\varphi_2$, wo c' eine zweite Konstante ist. Bei gleicher Helligkeit ist

$$\frac{c\,J_2}{r_2^2} \cos^2\varphi_2 = c' \sin^2\varphi_2.$$

Bei Beleuchtung durch L_1 ergibt sich eine analoge Gleichung, in welcher statt des Index 2 der Index 1 tritt. Durch Division beider Gleichungen erhält man Gleichung 1).

Methode 2. Es wird der Polarisationsspiegel d fortgelassen und die Mattglasscheibe p durch die am Ende des Rohres R anzubringende Mattglasscheibe e (in Fig. 87 punktiert gezeichnet) ersetzt, welche nacheinander von L_1 und L_2 aus den Entfernungen r_1 und r_2 senkrecht beleuchtet wird. In diesem Falle wird ein linear polarisiertes, von L_a kommendes Lichtbündel mit einem natürlichen, von e kommenden verglichen, und es ergibt sich

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} \frac{\sin^2\varphi_2}{\sin^2\varphi_1} J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

b) Photometer von Babinet[1]).

Meßprinzip. Zwei senkrecht zueinander polarisierte Lichtströme werden miteinander gemischt und gleich[2]) gemacht, so daß sie sich wie ein natürlicher Lichtstrom verhalten. Die Abwesenheit der Polarisation wird mittels eines Soleilschen Polariskops, welches aus der Doppelquarzplatte K und dem Nicol N (Fig. 88) besteht, an der gleichen Färbung und Helligkeit der Hälften von K erkannt, welche andernfalls komplementär gefärbt sind.

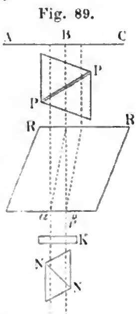
Fig. 88.

Beschreibung des Photometers. An das Rohr T_1 ist unter 70° das Rohr T_2 angesetzt. Diese Rohre sind durch die Mattgläser G_1 und G_2 geschlossen, welche von L_1 und L_2 beleuchtet werden. Die von G_1 und G_2 ausgehenden Bündel 1 und 2 fallen unter dem Polarisationswinkel auf den Glasplattensatz s und gehen, nachdem 1 durch s hindurchgegangen und 2 an s reflektiert ist, in der Richtung 3 als gemeinsames Strahlenbündel weiter und gelangen durch das Soleilsche Polariskop ins Auge 0. Durch Änderung der Entfernungen r_1 und r_2 wird auf gleiche Färbung der Hälften von K eingestellt.

Das Photometer wird vielfach fälschlich Dubosq zugeschrieben.

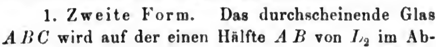
c) Polarisationsphotometer von Wild[3]).

Fig. 89.



Wild hat im ganzen vier Anordnungen angegeben, von denen wir hier nur die zweite und vierte besprechen wollen. Das Meßprinzip ist dasselbe wie beim Babinetschen Photometer, nur daß die Gleichheit der beiden miteinander gemischten Lichtströme mittels eines Savartschen Polariskops durch das Verschwinden von geradlinigen, parallelen Interferenzstreifen bestimmt wird. Ein solches Polariskop besteht aus zwei aufeinander gekitteten, unter 45° gegen die Achse geschnittenen Bergkristallplatten K und dem Nicol NN (Fig. 89), dessen Hauptschnitt einen Winkel von 45° mit den gekreuzten Hauptschnitten der beiden Platten einschließt.

1. Zweite Form. Das durchscheinende Glas ABC wird auf der einen Hälfte AB von L_2 im Ab-



[1]) C. R. 37, 774 (1853).

[2]) Vgl. Anm. 2, S. 196.

[3]) 1. Form, Pogg. Ann. 99, 235 (1856); 2. Form, ebenda 118, 193 (1863); 3. Form, Bull. de St. Pétersb. 32, 193 (1887); 4. Form, Mél. phys. et chim. 13, 1 (1888).

stande r_2, auf der anderen Hälfte BC von L_1 im Abstande r_1 senkrecht beleuchtet. Die von diesen Flächen in dazu senkrechter Richtung ausgehenden Strahlen durchlaufen zunächst ein polarisierendes Nicolsches und Foucaultsches Prisma PP, das sich um die auf AC senkrecht stehende und durch B gehende Achse des Apparates meßbar drehen läßt. Sodann fallen sie senkrecht auf die natürliche Begrenzungsfläche eines nicht zu kurzen Kalkspatrhomboeders RR, wo sie sich je in einen ordentlichen und außerordentlichen Strahl zerlegen. Der von B ausgehende Strahl tritt bei β als ordentlicher, bei α als außerordentlicher Strahl aus RR wieder heraus. Durch jeden Punkt von $\alpha\beta$ tritt demnach ein ordentlicher und ein außerordentlicher Strahl in derselben Richtung senkrecht zur unteren Begrenzungsfläche aus RR aus. Diese sich überdeckenden Strahlen durchsetzen, bevor sie ins Auge gelangen, das Savartsche Polariskop. Bei der photometrischen Messung wird der Polarisator PP so lange meßbar gedreht, bis die Interferenzstreifen verschwinden. Alsdann ist

$$J_2 = C \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot cot^2 \varphi \cdot J_1 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

wenn φ der Winkel, welchen die Hauptschnitte von PP und RR bilden, und C eine wenig von 1 abweichende Konstante ist.

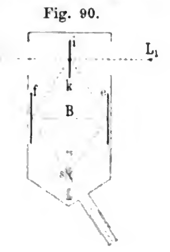
Beweis von Gleichung 3). Die von AB und BC auf das Polariskop gesandten Lichtströme wären, wenn die Strahlen auf ihren Wegen keinen Verlust durch Reflexion, Absorption und Doppeltbrechung erlitten, $c_2 \frac{J_2}{r_2^2}$ und $c_1 \frac{J_1}{r_1^2}$, wo c_2 und c_1 gewisse nahezu gleiche Konstante sind. Durch PP werden sie geschwächt auf $c_2 D \frac{J_2}{r_2^2}$ und $c_1 D \frac{J_1}{r_1^2}$. Durch RR werden sie weiter geschwächt auf $c_2 D D_o \frac{J_2}{r_2^2} sin^2 \varphi$ und $c_1 D D_e \frac{r_1^2}{J_1} \cdot cos^2 \varphi$. Durch Gleichsetzung der letzteren Ausdrücke ergibt sich, wenn $c_1 D_e / (c_2 D_o) = C$ gesetzt wird, Gleichung 3).

Zur Bestimmung von C richtete Wild das Photometer auf eine gleichmäßig beleuchtete Fläche und erhielt aus dem Drehungswinkel $\varphi' = 45^0\,24'$ $C = tg^2\varphi' = 1{,}0283$. Nach seinen Angaben konnte Wild die Unsicherheit in der Bestimmung von J_2/J_1 bis auf etwa 0,2 Proz. vermindern, als er die Anordnung so traf, daß die Streifen nicht ganz zum Verschwinden gebracht wurden, so daß also eine Art Kontrastwirkung zustande kam. Das Arbeiten mit dem Photometer ermüdet jedoch das Auge sehr schnell.

2. Vierte Form. Dieses für technische Zwecke bestimmte Photometer, welches eine Verwendung auf einer geraden Photometerbank gestattet, stimmt im Prinzip mit dem Babinetschen Photometer, in der äußeren Anordnung mit dem Lummer-Brodhunschen Photometer überein.

Die von dem Photometerschirm ik (Fig. 90) ausgehenden Strahlenbündel fallen auf die Spiegel e und f, welche sie unter dem Polarisationswinkel auf einen aus zehn je 0,5 mm dicken, nahezu planparallelen Platten bestehenden Glasplattensatz s werfen. Von hier aus gelangen sie als ein vereinigtes Bündel durch das in der Figur nicht angegebene Savartsche Polariskop ins Auge. Bei der Messung wird der Apparat auf der Bank so lange verschoben, bis die Interferenzstreifen verschwinden. Sodann dreht man den Apparat um 180° und macht eine neue Einstellung. Ergeben sich hierbei das eine Mal die Entfernungen r_1, r_2, das andere Mal r'_1, r'_2, so ist

Fig. 90.



$$J_2 = \frac{r_2\, r'_2}{r_1\, r'_1} J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Das eben beschriebene Photometer ist eine Modifikation der dritten Form von Wild.

d) Anordnung von Weber [1].

Zwischen Milchglasplatte G (Fig. 64b, S. 185) und Photometerwürfel W werden zwei Nicols eingeschaltet, so daß ein linear polarisiertes, durch B eingetretenes Lichtbündel mit einem natürlichen, von L_a stammenden verglichen wird. Die photometrische Einstellung erfolgt teils durch Verschieben der Milchglasplatte G_a, teils durch Drehen des Analysatornicols.

§ 99. Polarisationsphotometer von Martens [2].

Martens hat das S. 190 beschriebene Photometer durch Einschaltung eines Wollastonschen Prismas aus Kalkspat und eines Analysatornicols in ein Polarisationsphotometer verwandelt und dem Apparate später durch Hinzufügung noch anderer Teile eine Form gegeben, welche er als *Universalphotometer für weißes Licht* bezeichnet. Wir wollen uns im folgenden mit der letzteren Anordnung als der allgemeineren beschäftigen.

a) Beschreibung und Prinzip des Photometers.

Der mittlere Teil M (Fig. 91a und b) läßt sich um die Säule S als Achse drehen. M trägt rechts das Gehäuse G für die elektrische Vergleichslampe g sowie das mit dem Teilkreise B versehene eigentliche Polarisationsphotometer C, links den um die Achse von M drehbaren, mit dem Teilkreise A und dem Reflexionsprisma P ver-

---

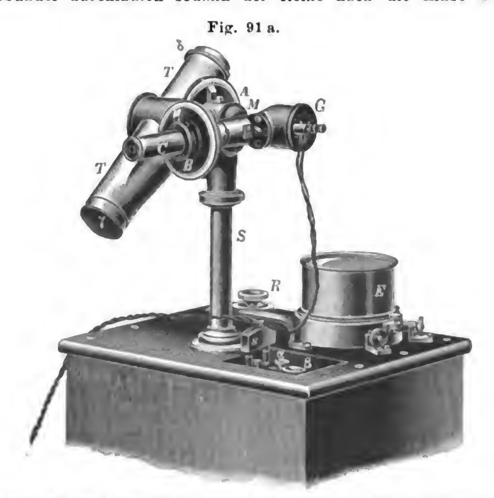
[1]) Z. f. Instrk. **11**, 6 (1891); Schr. d. Naturw. Vereins f. Schleswig-Holstein **8**, 187 (1891).

[2]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. **1**, 204 (1899) und **5**, 149 (1903); Phys. Z. **1**, 299 (1899/1900).

sehenen Tubus T. Drei Deckel passen in die beiden Öffnungen des Tubus T. Der eine ist mit Gips bekleidet, der zweite ist mit einer engen zentrischen Öffnung versehen, der dritte trägt eine auf beiden Seiten mattgeschliffene 1,0 mm dicke Milchglasplatte.

Die von F ausgehenden Strahlen werden zunächst im Prisma P, sodann im Prisma Q total reflektiert und gelangen schließlich durch die Öffnung a in das Polarisationsphotometer C. Die andere Öffnung b des letzteren ist mit einem Milchglase bedeckt und wird von g beleuchtet. Die beiden durch die Öffnungen a und b eingetretenen Lichtbündel durchlaufen sodann der Reihe nach die Linse O, das

Fig. 91 a.



Wollastonprisma W, ein Zwillingsprisma mit den beiden Hälften 1 und 2, das Analysatornicol N mit der angekitteten Linse E und die Linse H.

Wie beim Königschen Spektralphotometer (§ 119) entstehen in der Ebene der Okularblende D von jeder der beiden Öffnungen a und b vier Bilder. Die Anordnung ist so getroffen, daß ein Bild von a mit einem Bilde von b, das zu dem ersteren senkrecht polarisiert ist, in der zentralen Öffnung der Blende zusammenfällt, während die übrigen drei Bilder jeder Öffnung abgeblendet werden. Das Licht dieser beiden Bilder kommt von den beiden Hälften 2 und 1 des Zwillingsprismas her. Daher sieht der Beobachter diese beiden Vergleichsfelder mit Licht erleuchtet, welches durch die Öffnung a bzw. b eingetreten ist. Durch Drehung des Analysatornicols N wird auf gleiche Helligkeit der Vergleichsfelder eingestellt.

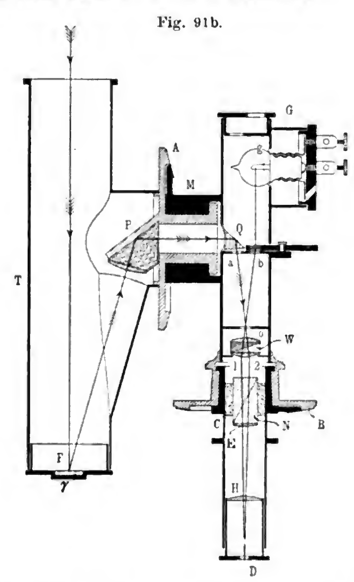
b) Messung der Lichtstärke.

Man visiert die zu messende Lampe L unter Benutzung des Deckels mit enger zentrischer Öffnung an und ersetzt diesen dann durch den Deckel mit dem Gipsschirm F. Muß das Nicol um den Winkel φ aus der Dunkelstellung für das Feld 1 gedreht werden, so ist

$$J = C r^2 tg^2 \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

wenn r den Abstand zwischen L und F bezeichnet.

Fig. 91b.



Ergibt eine Normallampe L_n, welche sich im Abstande r_n von F befindet, den Winkel φ_n, so ist die Konstante

$$C = \frac{J_n}{r_n^2 \, tg^2 \varphi_n} .$$

c) Messung der Beleuchtung.

Man ersetzt den Gipsschirm F durch das Milchglas und verschließt das andere Ende von T. Man bringt sodann das Milchglas in die zu untersuchende Fläche und macht die Einstellung φ. Alsdann ist

$$E = C' tg^2 \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Ergibt eine Normallampe L_n, welche das Milchglas aus der Entfernung r_n senkrecht beleuchtet, den Drehungswinkel φ'_n, so ist die Konstante

$$C' = \frac{J_n}{r_n^2\, tg^2\, \varphi'_n}.$$

d) Messung der Flächenhelle.

Man entfernt den Gipsschirm F und läßt die zu untersuchende Fläche S, z. B. einen Projektionsschirm, auf dem Wege $S\gamma PQ$ Strahlen ins Photometer senden; es ergibt sich

$$e = C''\, tg^2\, \varphi \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

Bedingt eine Fläche S_n, deren Flächenhelle in Richtung γP gleich e_n ist, den Drehungswinkel φ'_n, so ist die Konstante

$$C'' = \frac{e_n}{tg^2\, \varphi'_n}.$$

Als Fläche S_n benutzte Martens bei einem Versuche die Oberfläche eines kreisrunden Gipsschirmes, der senkrecht zur Richtung γP gestellt und durch eine konstante Lichtquelle beleuchtet wurde; die Einstellung sei φ''_n. Sodann bestimmte er bei unveränderter Beleuchtung des Schirmes dessen Lichtstärke in dazu senkrechter Richtung. Ist dieselbe gleich J_n und der Flächeninhalt des Schirmes gleich f, so ist $e_n = J_n/f$, so daß $C'' = J/(f\, tg^2\, \varphi'_n)$.

e) Untersuchung von teilweise geradlinig polarisiertem Lichte.

Hier kommt 1. die Richtung, in welcher der polarisierte Anteil schwingt, 2. das von Martens als *Polarisationsfaktor* bezeichnete Verhältnis zwischen dem polarisierten und gesamten Lichte in Betracht.

1. Bestimmung der Richtung der Schwingungsebene. Man richtet das Polarisationsphotometer C, bei welchem man die Einsteckblende mit den beiden exzentrischen Öffnungen a und b durch eine Blende mit einer einzigen zentrischen Öffnung ersetzt hat, auf eine gleichmäßig helle Fläche, welche nur natürliches Licht aussendet, und stellt durch Drehen des Analysatornicols N auf gleiche Helligkeit der Vergleichsfelder 1 und 2 ein. Hierauf visiert man den zu untersuchenden Gegenstand, z. B. das Himmelsgewölbe, an und dreht das ganze Photometer C um seine Achse. Alsdann gibt es vier Stellungen, in denen 1 und 2 gleich hell erscheinen. In diesen vier Stellungen bildet der Hauptschnitt des Nicols mit der gesuchten Schwingungsebene Winkel von 0 oder 90°. Welcher von diesen beiden Fällen vorliegt, zeigt sich, wenn man C aus seiner Gleichheitsstellung etwas herausdreht.

2. Bestimmung des Polarisationsfaktors. Dreht man C um 45° aus der Gleichheitsstellung heraus, so muß man das Nicol um

den Winkel ε drehen, damit wieder Gleichheit vorhanden ist. Alsdann ist der Polarisationsfaktor

$$\frac{\mathfrak{P}}{\mathfrak{N} + \mathfrak{P}} = \sin 2\varepsilon \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

wenn $\mathfrak{N}$ bzw. $\mathfrak{P}$ den Anteil des natürlichen bzw. geradlinig polarisierten Lichtes bezeichnet, das von dem zu untersuchenden Gegenstande ausgeht.

Beweis. Man kann $\mathfrak{N}$ in zwei Komponenten $^1/_2\,\mathfrak{N}$ zerlegen, von denen die eine in der Richtung des polarisierten Lichtes, die andere in dazu senkrechter Richtung schwingt. In der durch Drehen um ε herbeigeführten Gleichheitsstellung erscheinen 1 und 2 in den Helligkeiten $0{,}5\, c\, \mathfrak{N} \cos^2 (45 - \varepsilon)$ und $c\,(0{,}5\, \mathfrak{N} + \mathfrak{P}) \sin^2 (45 - \varepsilon)$, wo c eine Konstante ist. Durch Gleichsetzen folgt

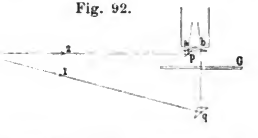
$$\frac{0{,}5\,\mathfrak{N}}{0{,}5\,\mathfrak{N} + \mathfrak{P}} = tg^2 (45 - \varepsilon),$$

woraus sich Gleichung 4) ergibt.

f) Bestimmung des Durchlässigkeitsvermögens D von photographischen Platten.

Hierzu dient folgende Modifikation (Fig. 92). Das durch irgend eine Lichtquelle beleuchtete Milchglas m sendet zwei Lichtbündel 1 und 2 aus. Von diesen tritt 2, nachdem es in p reflektiert ist, in die eine Öffnung a, während 1 nach Reflexion in q durch die zu untersuchende photographische Platte G hindurch in die andere Öffnung b des Polarisationsphotometers tritt.

Fig. 92.



Es sei φ der Drehungswinkel aus der Dunkelstellung für die Strahlen 2. Ergibt sich nach Entfernung der Platte G die neue Einstellung φ', so ist

$$D = \frac{tg^2\,\varphi}{tg^2\,\varphi'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Neuerdings legt Martens[1]) zur Berücksichtigung des Einflusses des diffusen Durchganges der Strahlen durch die photographische Platte unter die letztere eine Milchglasplatte. Für eine nur regelmäßig durchlassende, also streng durchsichtige Substanz läßt man die Milchglasplatte natürlich fort.

§ 100. Beleuchtungsmesser von Classen[2]).

Es wird die Lichtverteilung in von Tageslicht beleuchteten Schulzimmern ohne Benutzung einer Zwischenlichtquelle bestimmt. Auf

[1]) Franz Schmidt und Haensch, Katalog III über photometrische Apparate, S. 31, Berlin 1904.

[2]) Phys. Z. 3, 137 (1901/02). J. f. G. u. W. 45, 235 (1902).

einem Stativ sind zwei 1 m lange, nach allen Richtungen bewegliche Arme befestigt, welche zwei weiße verschiebbare Schirme P_1 und P_2 tragen. Man bringt zunächst P_1 an eine solche Stelle, wo die Beleuchtung möglichst groß ist. Man bringt P_2 sodann nacheinander in die verschiedenen zu untersuchenden Ebenen und vergleicht die auf P_2 erzeugte Beleuchtung mit der auf P_1 erzeugten. Die Strahlen von P_2 gelangen, nachdem sie durch ein Rauchglas hindurchgegangen und von einer Spiegelvorrichtung reflektiert sind, auf einen Lummer-Brodhunschen Würfel W. Zwischen W und P_1 sind zwei Nicols eingeschaltet. Die photometrische Einstellung erfolgt durch Drehen des einen Nicols. Das Rauchglas soll den Lichtverlust in den Nicols kompensieren.

§ 101. Straßenphotometer von Brodhun[1]).

a) Modell 1.

1. Beschreibung und Prinzip des Photometers.

Am Ende des horizontalen Rohres A (Fig. 93 a) befindet sich die konstante Vergleichslichtquelle L_a (elektrische Glühlampe), welche die Milchglasplatte G_a beleuchtet. Die von G_a ausgehenden Strahlen werden durch die Linse C_a parallel gemacht; sie durchlaufen sodann den auf S. 210 beschriebenen Sektorenapparat, hierauf das Fresnelsche Prisma 1, werden von der gemeinsamen Hypotenusenfläche $a\,b$ des Photometerwürfels W an den versilberten Stellen in das Beobachtungsrohr F reflektiert und dort durch die Linse C' in der Ebene der Blende D wieder vereinigt. Das um die Achse von A drehbare Rohr B trägt das Reflexionsprisma R und den Gipsschirm G, welcher von

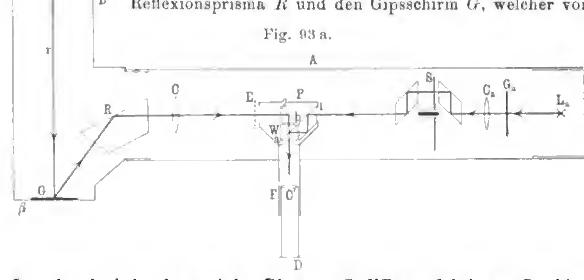


Fig. 93 a.

L senkrecht beleuchtet wird. Die von G diffus reflektierten Strahlen werden durch Reflexion in R in das Rohr A geworfen, durch die Linse C parallel gemacht, in 2 reflektiert und, nachdem sie W durchlaufen haben, durch C' ebenfalls in der Ebene von D wieder vereinigt. Der durch D

[1]) Tätigk. d. Reichsanstalt. Z. f. Instrk. **14**, 310 (1894); **15**, 337 (1895).

blickende Beobachter[1]) stellt mittels C' als Lupe scharf auf $a\,b$ ein und sieht die reflektierenden Stellen von $a\,b$ durch Licht von L_a, die durchlässigen Stellen durch Licht von L beleuchtet.

Dadurch, daß G_a und G am Orte von D abgebildet werden, erreicht man: 1. daß das von jedem Punkte der Hypotenusenfläche ab ausgehende Strahlenbündel die ganze Pupille ausfüllt, 2. daß von den Photometerschirmen G_a und G nur kleine und deshalb gleichmäßig beleuchtete Teile, nämlich die auf G_a und G liegenden Bilder der Okularblende D zur Messung benutzt werden.

Fig. 93 b.

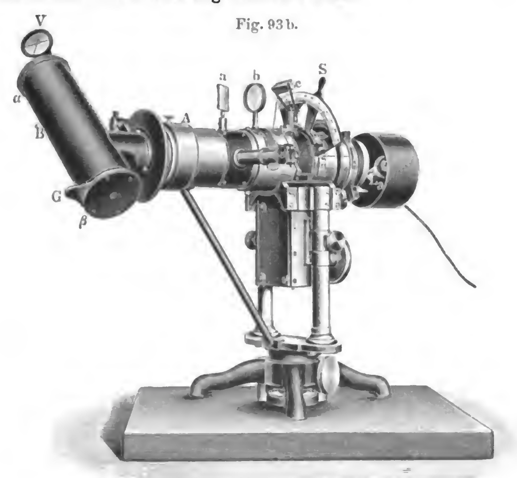


Fig. 93 b gibt eine perspektivische Ansicht des Photometers. Der Beobachter sieht mittels des Spiegels a und der Linse b auf die Teilung des Sektors, der mittels Handgriffes S verstellt wird. Das Photometer wird bei Benutzung in der Reichsanstalt auf einen Wagen gestellt, der auf den durch das Photometerzimmer gelegten Schienen (Fig. 158 und 159, § 144) läuft und meßbar verschoben wird.

2. Messung der Lichtstärke.

Man schlägt vor das in den Figuren obere Ende α des Rohres B eine mit einem zentralen Kreuz versehene Glasplatte V, zieht die Gipsplatte G bei β heraus und visiert durch eine enge zentrale Öffnung in β und durch die Mitte des Kreuzes nach der zu messenden Lampe L.

---

[1]) Anwendung der Maxwellschen Methode (§ 119) auf weißes Licht.

Sodann schlägt man die Glasplatte V zurück, schiebt die Gipsplatte G wieder ein und macht durch Verstellen des Sektors S eine Einstellung auf gleiche Helligkeit bzw. gleichen Kontrast. Ist f die sich hierbei ergebende Größe des Sektors, so ist

$$J = C r^2 f \quad \text{. . . . .} \quad 1)$$

wo C eine Konstante und r die Entfernung zwischen L und G ist.

C wird mittels einer Normallampe L_n, welche aus der Entfernung r_n den Schirm G beleuchtet, aus der Einstellung f_n bestimmt als

$$C = \frac{J_n}{r_n^2 f_n} \quad \text{. . . . .} \quad 2)$$

Beweis von Gleichung 1). Die Helligkeit des durch L_a bzw. L beleuchteten Gesichtsfeldes ist cf bzw. $c' J/r^2$, wo c und c' gewisse Konstante sind. Durch Gleichsetzung beider Ausdrücke ergibt sich Gleichung 1).

Beispiel. Bei der Bestimmung von C sei

$$J_n = 192 \text{ HK}; \quad r_n = 2{,}5 \text{ m}; \quad f_n = 40{,}6^0;$$

alsdann ist

$$C = \frac{192}{6{,}25 \cdot 40{,}6} = 0{,}7566.$$

Bei der Messung von L sei

$$r = 5{,}441 \text{ m}; \quad f = 43{,}6^0.$$

Alsdann ist

$$J = 0{,}7566 \cdot 5{,}441^2 \cdot 43{,}6 = 977 \text{ HK}.$$

3. Bemerkungen über das Arbeiten mit diesem Photometer.

Ist J so groß, daß man selbst bei ganz geöffnetem Sektor keine Einstellung machen kann, so vergrößert man entweder den Abstand r oder bringt, wenn dies nicht angängig ist, L_a näher an G_a heran oder schaltet in dem Rohre A vor dem Photometerkörper bei E Rauchgläser (in Fig. 93a punktiert gezeichnet) ein oder führt die drei oder zwei dieser Operationen gleichzeitig aus.

Hat man hintereinander Lichtstärken sehr verschiedener Größe zu messen — wie es z. B. der Fall ist, wenn man Bogenlampen unter verschiedenen Ausstrahlungswinkeln gegen die Lampenachse zu messen hat (§ 149) —, so empfiehlt es sich, die Anordnung so zu treffen, daß man eine möglichst hohe Sektorenablesung für die höchste zu messende Lichtstärke erhält, und bei bedeutend geringeren Lichtstärken ev. ein oder zwei Rauchgläser herauszunehmen oder durch stärker durchlässige zu ersetzen, um nicht zu kleine Zahlen für f zu erhalten.

Natürlich hat man für jede Kombination von Rauchgläsern die betreffende Konstante C besonders zu bestimmen oder aus einer der Konstanten zu berechnen, sobald man das Durchlässigkeitsvermögen der Rauchgläser kennt.

b) Modell 2.

4. Beschreibung des Photometers.

Das Rohr B ist durch einen schrägen, um die Achse von A drehbaren (in Fig. 94a in einem gegen Fig. 93a verkleinerten Maßstabe gezeichneten) Arm B' ersetzt, welcher die Spiegel M und M' [1]) sowie die Linsen C'' und C''' trägt. L steht fest und zwar im Fußpunkte des von der Mitte von M auf die Achse von A gefällten Lotes. Zum Zwecke der Justierung sind M, M' und C'' drehbar, C'' außerdem noch verschiebbar. Die Anordnung wird so getroffen, daß erstens L mittels M, C'' und M' am Orte von C''' und zweitens C'' mittels M' und C''' [2]) auf einer unmittelbar vor dem Photometerkörper bei E (Fig. 93a) befindlichen Milchglasplatte abgebildet werden. Die Linse C'' spielt hier also die Rolle eines Photometerschirmes. Der Schirm H blendet das direkte Licht von L ab.

Fig. 94a.

Es ist ersichtlich, daß bei dieser Anordnung nur diejenigen leuchtenden Gegenstände, die sich auf C''' abbilden, zur Messung gelangen. Fremdes Licht, das seitlich von L kommt, gelangt also nicht auf C''' und deshalb auch nicht ins Photometer.

Man kann somit mit diesem Apparate in vollständig hellen Räumen richtige Messungen ausführen, falls man in Richtung ML hinter L liegende leuchtende Gegenstände verdeckt oder hinter L einen kleinen schwarzen Schirm anbringt, der mit dem Arm B' fest verbunden ist, sich also gleichzeitig mit B' dreht.

Ein weiterer Vorzug ist:

Die Entfernung r zwischen zu messender Lampe und Photometerschirm ist konstant [daher die einfache Gleichung 3)].

Ein Übelstand ist, daß wegen der Kleinheit dieser Entfernung r dieser Apparat nur für Lichtquellen von kleinen Abmessungen zu verwenden ist. Für Lichtquellen mit größeren Abmessungen hat man Modell 1 zu benutzen.

Eine perspektivische Ansicht des Apparates in der Anordnung, wie sie in der Reichsanstalt üblich ist, gibt Fig. 94b (a. f. S.). Das Photometer befindet sich auf einem in der Höhe verstellbaren Tische; der daneben auf dem Fußboden stehende Kasten N enthält Akkumulatoren, welche zur Speisung der kleinen Beleuchtungslampe für die

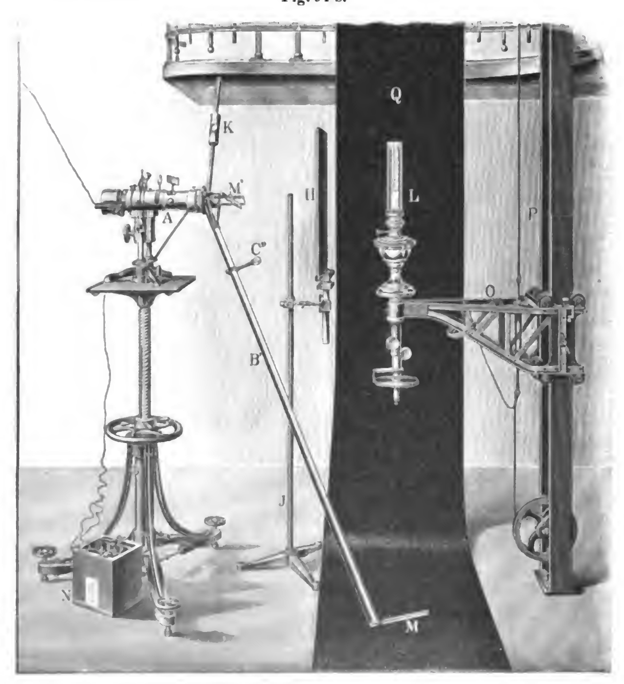
[1]) Statt des Spiegels M' wird jetzt ein Reflexionsprisma gebraucht.

[2]) Bei Modell 2 wird Linse C in Fig. 93a aus A entfernt.

15*

Sektorenteilung dienen. K ist ein Gegengewicht für den drehbaren Arm B'. Die zu messende Lampe L, in der Figur eine Petroleumglühlichtlampe, ist auf den Wagen O gestellt, welcher mittels des Aufzuges P in der Höhe verstellbar ist. Mittels des Samtstreifens Q, welcher vom Balkon des Photometerzimmers kommt und noch einen Teil des Fußbodens bedeckt, wird alles fremde Licht abgeblendet.

Fig. 94 b.



5. Messung der Lichtstärke.

Man stellt zunächst die Spiegel M und M' und die Linse C'' richtig ein und bringt den Arm B' unter Benutzung eines an A angebrachten Teilkreises in die gewünschte Richtung. Ergibt sich bei der photometrischen Einstellung die Sektorenöffnung f, so ist

$$J = C'f \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

wo C' eine neue Konstante ist. C' wird mittels L_n aus f_n bestimmt als

$$C' = \frac{J_n}{f_n} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

6. Für das Arbeiten mit dieser Form des Photometers gelten dieselben Bemerkungen wie die unter Nr. 3 für das Modell 1 gemachten, nur daß hier der Abstand r stets unveränderlich gehalten wird.

Hat man nur Lichtquellen von ungefähr derselben Lichtstärke zu messen, so kann man dadurch, daß man L_a in geeigneten Abstand von G_a bringt, erreichen, daß C' eine ganze Zahl bzw. der reziproke Wert einer ganzen Zahl wird. Mithin findet man dann J durch eine leichte Umrechnung aus dem abgelesenen Werte f.

Sechstes Kapitel.

Photometrieren verschiedenfarbiger Lichtquellen.

§ 102. Schwierigkeiten des Photometrierens.

Solange es sich um den Vergleich von Lichtquellen von genau derselben spektralen Zusammensetzung, d. h. von *genau gleichfarbigen Lichtquellen* handelt, stellen alle Beobachter, mögen sie nun farbentüchtige Augen haben oder nicht, mittels der bisher beschriebenen Photometer und Meßmethoden leicht ein und machen, abgesehen von den unvermeidlichen Beobachtungsfehlern, dieselbe Einstellung.

Dagegen ergeben sich beim *Vergleich verschiedenfarbiger Lichtquellen* — und mit solchen hat man es in der Praxis meistens zu tun — Schwierigkeiten. Ein ungeübter Beobachter hat schon ein Gefühl der Unsicherheit, wenn er beurteilen soll, ob zwei Vergleichsfelder gleich hell sind, welche nur wenig in der Färbung voneinander abweichen, von denen z. B. das eine durch eine normal brennende elektrische Kohlenfadenlampe, das andere durch eine Hefnerlampe beleuchtet ist. Bei beträchtlich größeren Farbendifferenzen scheint einem solchen Beobachter ein Vergleich anfangs überhaupt unmöglich zu sein; es zeigt sich jedoch, daß man bei hinreichender Übung und mit gut ausgeruhtem Auge stets nahezu dieselbe Einstellung macht.

Ferner strengt das Photometrieren bei großen Farbenunterschieden das Auge stark an, so daß man die Messungen von Zeit zu Zeit unterbrechen muß, damit sich das Auge wieder erholt. Überhaupt sollte man, wie schon oben angedeutet wurde, solche Vergleiche nur mit gut

ausgeruhtem Auge ausführen, weil die Sicherheit der Einstellung vom Zustande, in welchem sich dasselbe befindet, abhängt.

Als ein Hauptübelstand wurde früher das Auftreten des Purkinjeschen Phänomens bezeichnet; dieses tritt jedoch nach Brodhun überhaupt nicht mehr auf, wenn man für *genügende Beleuchtung* der Photometerfelder sorgt (S. 61), sobald also nach unseren jetzigen Anschauungen gemäß der Kriesschen Theorie (S. 71) von den beiden Netzhautelementen die Stäbchen vollständig oder doch nahezu ausgeschaltet sind.

Bei schwacher Beleuchtung kann die *Größe* der Felder die Helligkeitsschätzung beeinflussen, wie folgender Versuch von Weber (Fig. 95) zeigt. Ein mit rotem und blauem Papier überzogener Pappkarton wird durch Regulieren der Lampen derart beleuchtet, daß man Rot und Blau gleich hell sieht. Fährt man alsdann mit einem zweiten (punktiert gezeichneten) Karton von unten her über den ersteren, so daß beständig zwei gleich große Dreiecke in Rot und Blau frei bleiben, so wächst die Helligkeit des roten Feldes; bei *Verkleinerung* der Flächen entsteht also ein dem Purkinjeschen Phänomen entgegengesetztes. Nach Macé de Lépinay und Nicati[1]) tritt diese Erscheinung nicht mehr auf, sobald der Winkel, unter welchem die Flächen erscheinen, 45′ geworden ist, sobald also das Netzhautbild höchstens die fovea centralis bedeckt, welche nur Zapfen enthält; wenn also jetzt die Flächen weiter verkleinert werden, so bleiben sie gleich hell. Dies letztere Ergebnis gilt nicht nur für schwache Beleuchtung, sondern in Übereinstimmung mit den Untersuchungen Brodhuns auch für hinreichend starke Beleuchtung.

Fig. 95.

Für gewöhnlich wird man hinreichend großen und hinreichend stark beleuchteten Feldern den Vorzug geben.

Schließlich ist es ein großer Übelstand, daß Farbenblinde beträchtlich anders als Personen mit normaler Farbenempfindung einstellen können, ja daß selbst die letzteren Abweichungen zeigen, wenn auch nicht so bedeutende, wie man gewöhnlich annimmt. Totalfarbenblinde stellen bei jeder Helligkeit so ein, wie die übrigen Personen bei sehr geringer Helligkeit; (eine sehr geringe Helligkeit erhält man am einfachsten, indem man eine Blende, deren Öffnung bedeutend kleiner als die Pupille ist, vor das Auge hält). Bei großer Helligkeit finden nach A. König[2]) Grünblinde etwa dieselben Werte wie Farbentüchtige, dagegen Rotblinde Werte, welche zwischen denen der Farbentüchtigen und Totalfarbenblinden liegen. Zu technischen Vergleichungen ver-

---

[1]) Ann. Chim. Phys. (5) **24**, 289 (1881) und (5) **30**, 145 (1883).

[2]) Müller-Pouillet, Optik, bearbeitet von Lummer. Braunschweig, Friedr. Vieweg u. Sohn, 1897, S. 653.

schiedenfarbiger Lichtquellen sollten deshalb nur Farbentüchtige herangezogen werden.

Von einzelnen Photometrikern wird auch heute noch behauptet, daß die durch verschiedenfarbige Beleuchtungen hervorgebrachten Helligkeitsempfindungen inkommensurabel seien, daß also vom wissenschaftlichen Standpunkte ein solcher Vergleich unmöglich sei. Verfasser kann diese Behauptung nicht als zutreffend anerkennen. Denn ein jeder vermag mit Sicherheit anzugeben, ob ein Vergleichsfeld heller oder dunkler als ein zweites anders gefärbtes ist, falls dieser Unterschied erheblich ist. Allerdings ist selbst bei einem geübten Beobachter die Empfindlichkeit gegen Helligkeitsunterschiede von verschiedengefärbten Flächen kleiner als im Falle gleichgefärbter Flächen.

Für den Vergleich verschiedenfarbiger Lichtquellen sind die in den folgenden Abschnitten A, B und C zu besprechenden Methoden vorgeschlagen. Sehr viel Beachtung hat in der letzten Zeit die Flimmerphotometrie gefunden, als deren Vorzug anzusehen ist, daß durch die dabei auftretende Mischfarbe der Farbenunterschied der Lichtquellen keinen so störenden Einfluß wie bei den anderen Methoden ausübt. Auf jeden Fall steht zu erwarten, daß die Lösung des Problems der heterochromen Photometrie — so wird der Vergleich von ungleichfarbigen Lichtquellen nach Brücke genannt — wesentlich durch die Kriessche Theorie gefördert werde, welche uns die Wirkungsweise unserer beiden Netzhautelemente, der Stäbchen und Zapfen, zu trennen und ihre gesonderten Aufgaben zu ergründen gelehrt hat.

A. Einstellung auf gleiche Helligkeit.

§ 103. Anwendung von farbigen Mitteln.

Durch geeignete farbige Mittel wird der Farbenunterschied entweder stark verringert (a) oder ganz aufgehoben (b, c und d), so daß man in den drei letzteren Fällen bei gleichfarbigem Lichte photometriert.

a) In der Reichsanstalt sucht man sich für die technischen Prüfungen unter Benutzung einer geraden Photometerbank und eines Lummer-Brodhunschen Photometers den Vergleich dadurch zu erleichtern, daß man zwischen dem Photometer P und dem mit der Hefnerlampe gleichfarbigen Gebrauchsnormal L_n je nach Bedarf eine mehr oder minder stark bläulich gefärbte Glasplatte G einschaltet [1]), welche vollständig oder doch nahezu Farbengleichheit hervorruft.

---

[1]) Beim Brodhunschen Straßenphotometer schaltet man solche Platten bei der von der Vergleichslampe L_a beleuchteten Milchglasplatte G_a ein.

Ein Vorschlag Trescas — C. R. 82, 299 (1876) —, auch das Licht der zu messenden Lampe (Bogenlampe) zu färben ist nicht einwandfrei, da sich das Durchlässigkeitsvermögen einer Platte mit der Färbung der sie durchstrahlenden Lichtquelle ändert.

Durch G wird die Beleuchtung des von L_n bestrahlten Photometerfeldes geschwächt. Ist J_n die Lichtstärke von L_n, so ist die Lichtstärke des Systems $L_n + G$ gleich $D_n J_n$, wenn D_n das Durchlässigkeitsvermögen von G für die Strahlen von L_n ist.

Ausführung der Messungen. Außer der eigentlichen technischen Messung, nämlich dem Vergleich zwischen der zu messenden Lampe L und dem System $L_n + G$ *(Versuch I)*, hat man zur Auswertung des Systems $L_n + G$ noch einen *zweiten Versuch* (*II*) anzustellen. Der letztere läßt sich offenbar auf zweifache Weise ausführen. Entweder: man bestimmt nacheinander 1. J_n, indem man L_n ohne G mit der Hefnerlampe L_1 vergleicht, 2. D_n. Oder: man vergleicht $L_n + G$ direkt mit L_1.

Wir wollen hier den letzteren Weg wählen, und zwar sollen L_n und P bei allen Messungen fest miteinander verbunden sein, und es soll stets nach der Umlegungsmethode (S. 177) gemessen werden. Bezeichnet:

J die Lichtstärke von L; J_1 die aus der Luftfeuchtigkeit berechnete Lichtstärke der Hefnerlampe L_1 [Gleichung 3) S. 118]; r den Mittelwert aus den in beiden Lagen des Photometers gefundenen Abständen zwischen L und P; r_1 den entsprechenden Mittelwert für L_1, — so ist

$$J = \frac{J_1}{r_1^2} r^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

oder wenn wir die Konstante[1])

$$\frac{J_1}{r_1^2} = E \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

setzen

$$J = E r^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Bei diesem Verfahren braucht man also nur die Größe E zu kennen; übrigens kann man aus E die Größe $D_n J_n$ berechnen; denn es besteht die Beziehung

$$E = D_n J_n / (r_n - \tfrac{1}{3} d)^2, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

wenn d die Dicke der Glasplatte ist (vgl. S. 201).

In der Reichsanstalt benutzt man gewöhnlich diese Beobachtungsweise und entnimmt den Wert für J aus einer nach Gl. 3) berechneten Tabelle.

Beispiel. Es sei $J_1 = 1{,}022$ HK (vgl. Beisp. S. 119); $r_1 = 770{,}4$ mm; $r = 3038$ mm; alsdann ist $E = 1{,}722$ Lux; $J = 15{,}89$ (rund 15,9) HK.

$r_n = 568{,}6$ mm; $d = 1{,}5$ mm gibt $D_n J_n = 0{,}5557$ HK.

Beim Versuche II kann man allerdings eine Vergleichung verschiedenfarbiger Lichtquellen nicht umgehen. Allein man braucht diesen heterochromen Vergleich nur von Zeit zu Zeit auszuführen; am besten ist es, hierbei jedesmal *mehrere Beobachter* hinzuzuziehen und das Mittel zu nehmen. Ja man braucht diesen Vergleich, sobald dadurch die Konstante E (bzw. D_n) genau bestimmt ist, nicht mehr zu wiederholen. Vielmehr genügt es vollkommen, daß man von Zeit zu Zeit L_n ohne G mit der Hefnerlampe und einem Satze konstanter, ebenfalls mit L_n *gleichfarbiger* Glühlampen vergleicht und eine etwaige kleine Änderung von L_n in Rechnung setzt.

---

[1]) Durch die Umlegungsmethode erhalten wir eine von der Ungleichseitigkeit des Photometers unabhängige Konstante E.

b) Fabry[1]) empfiehlt statt einer Glasplatte zwei absorbierende Flüssigkeiten, von denen die eine das rote, die andere das blaue Ende des Spektrums absorbiert, zwischen Photometer und Normallampe einzuschalten. Durch Änderung der Schichtdicke oder der Konzentration kann man jede beliebige Färbung des betreffenden Feldes erhalten. Geeignet sind hierzu eine Lösung von kristallinischem Kupfersulfat in Ammoniak und Wasser, sowie eine Lösung von Jod und Jodkalium in Wasser.

Beim Vergleiche der Normallampe mit der zu messenden Lampe, sowie mit einer Einheitslampe wird jedesmal durch Auswahl geeigneter Schichtdicken oder Konzentrationen der Flüssigkeiten Färbungsgleichheit der Photometerfelder hergestellt. Natürlich müssen die Durchlässigkeitsvermögen der beiden Systeme von Flüssigkeitsschichten vorher bestimmt sein. Das Verfahren ist nicht einfach genug.

c) Methode von Crova[2]). Crova geht von spektralphotometrischen Messungen der Sonne und Carcellampe aus, die er gemeinsam mit Lagarde (§ 115, c) ausgeführt hat. Er trägt in demselben rechtwinkeligen Koordinatensystem die Wellenlängen als Abszissen, die entsprechenden Lichtstärken als Ordinaten auf und bestimmt die Flächeninhalte F_a und F_b, welche die so entstehenden Kurven A (Sonne) und B (Carcel) mit der Abszissenachse einschließen. Das Verhältnis F_a/F_b sei n. Dividiert man die Ordinaten der Kurve A durch n, so erhält man eine neue Kurve A', welche mit der Abszissenachse ebenfalls den Inhalt F_b einschließt. Die Kurven A' und B schneiden sich in einem Punkte, dessen Abszisse 0,582 μ ist. Hieraus folgt, daß die Gesamtlichtstärken von Sonne und Carcellampe in demselben Verhältnisse stehen wie die Lichtstärken für die Wellenlänge 0,582 μ. Wenn man also nur die letzteren Strahlen mittels eines Spektralphotometers (§ 116 bis 122) vergleicht, kann man richtige Messungen ausführen. Für den praktischen Gebrauch empfiehlt Crova eine etwa 7 mm dicke Schicht Flüssigkeit vor das Auge zu setzen, welche durch passende Mischung einer Eisenchloridlösung mit einer Nickelchlorürlösung hergestellt ist und bloß die Strahlen zwischen den Wellenlängen 0,630 und 0,534 μ (orange, gelbe und grüne) mit einem Maximum bei 0,582 μ, also in der Nähe der Linie D (0,589 μ), hindurchläßt.

Die von Crova gefundene Strahlenart ist jedoch, worauf übrigens Crova selbst aufmerksam macht, nur für den Vergleich zwischen Sonne und Carcellampe zu benutzen, da sich das Verhältnis zwischen Gesamtlichtstärke und Lichtstärke für eine gegebene Wellenlänge mit der Temperatur der Lichtquelle ändert.

---

[1]) C. R. **137**, 743 (1903).

[2]) C. R. **93**, 512 (1881); **95**, 1271 (1882); **99**, 1067 (1884). Ann. Chim. Phys. (6) **6**, 528 (1885).

d) Methode von Lépinay und Nicati[1]). Man macht nacheinander zwei Messungen in gleichfarbigem Lichte, indem man erstens durch eine 3 cm dicke Schicht von Nickelchlorür von 18° Beaumé, welche nur die grünen Strahlen hindurchläßt, und zweitens durch eine ebenso dicke Schicht von Eisenchlorid von 38° Beaumé, welche nur die roten Strahlen hindurchläßt, blickt. Sind Gr und Ro die so gefundenen Lichtstärkenverhältnisse, so ergibt sich das Verhältnis J der Gesamtlichtstärken aus

$$\frac{J}{Ro} = \frac{1}{1 + 0{,}208\left(1 - \frac{Gr}{Ro}\right)} \quad \ldots \ldots \quad 5)$$

Hieraus folgt für

$\frac{Gr}{Ro} =$	$\frac{J}{Ro} =$	$\frac{Gr}{Ro} =$	$\frac{J}{Ro} =$
0,8	0,96	2,0	1,26
1,0	1,00	2,2	1,33
1,2	1,04	2,4	1,41
1,4	1,09	2,6	1,50
1,6	1,14	2,8	1,60
1,8	1,20		

Nach neueren Untersuchungen von Lépinay[2]) spielt die Dicke und Konzentration der beiden Schichten keine Rolle, wofern die beiden Vergleichsfelder dieselbe Farbe haben.

Diese Methode wurde von Lépinay und Nicati für alle Lichtquellen, bei welchen *Kohlenstoff leuchtet*, aufgestellt, indem sie unter Zugrundelegung des Gesetzes von Becquerel die Annahme machten, daß diese Lichtquellen bei der gleichen Temperatur Licht derselben spektralen Zusammensetzung aussenden. Haben L und L_n dieselbe Temperatur, so müßten demnach die Verhältniszahlen J/Ro und Gr/Ro denselben Wert haben. Wenn man sodann die Temperatur von L ändert, so ändert sich die spektrale Zusammensetzung von L, und es ändern sich auch die Werte J/Ro und Gr/Ro, aber in verschiedenem Grade, und zwar so, daß man setzen kann

$$\frac{J}{Ro} = f\left(\frac{Gr}{Ro}\right) \quad \ldots \ldots \quad 6)$$

Unter Benutzung der oben erwähnten Lösungen wurde aus einer größeren Anzahl von Messungen an Lampen verschiedener Art die Funktion f als der auf der rechten Seite von Gleichung 1) gegebene Ausdruck bestimmt.

Die oben erwähnte Annahme der gleichen spektralen Zusammensetzung trifft jedoch für die betrachteten Lichtquellen nur annäherungs-

[1]) C. R. 97, 1428 (1883).
[2]) L'Eclair. électr. 8, 5 (1896).

weise[1]) zu. Dagegen ist sie für den schwarzen Körper natürlich streng gültig. Allein es ist sehr zweifelhaft, ob selbst für den schwarzen Körper eine so einfache Beziehung wie Gleichung 1) besteht. (Vgl. S. 97.)

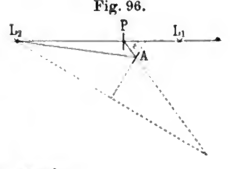
§ 104. Kompensationsmethode von Wybauw.

Man beleuchtet das eine Photometerfeld durch die zu messende stärkere Lichtquelle (Bogenlicht), das andere durch die Normallampe und einen berechenbaren Bruchteil des Lichtstromes der ersteren Lichtquelle. Das zweite Feld erhält dann eine Färbung, welche der des ersteren näher kommt. Ein Hauptübelstand bei diesem Verfahren ist, daß infolge der Lichtmischung die Empfindlichkeit des Auges gegen Helligkeitsunterschiede noch weniger als beim Bunsenschen Photometer ausgenutzt wird (S. 169 bis 172). Das Kompensationsprinzip wurde von Wybauw[2]) unter Benutzung eines Foucaultschen Photometers, ferner von Krüss und Grosse verwertet.

a) Kompensationsphotometer von Krüss[3]).

Die linke Seite eines Bunsenschen Photometerschirmes P (Fig. 96) wird von L_2 direkt, die rechte Seite von L_1 und außerdem von L_2 mittels des drehbaren Spiegels A auf dem Wege $L_2 A P$ beleuchtet. Der horizontale Abstand zwischen Spiegelachse und Photometerschirm sei a, der Winkel zwischen Spiegelebene und optischer Achse der Photometerbank ε, das Reflexionsvermögen des Spiegels R. Der von Krüss aufgestellten Formel hat Strecker[4]) die für die Zwecke der Praxis bequemere Form gegeben

Fig. 96.



$$J_2 = J_1 \frac{r_2^2}{r_1^2} K \frac{1}{1 + \frac{R K \varphi}{r_2^2}} \quad \cdots \cdots \quad 1)$$

wenn gesetzt wird

$$K = \frac{1}{1 + R \cos 2\varepsilon}$$

φ und K können aus einer einfachen Tabelle entnommen werden.

---

[1]) Nach Kurlbaum gehören, wie schon auf S. 101 bemerkt wurde, gewöhnliche Kerzen nicht zu der Gruppe von Körpern, deren Strahlungseigenschaften zwischen denen des schwarzen Körpers und des blanken Platins liegen, sondern sie sind noch selektiver als blankes Platin.

[2]) Bull. de la Soc. Belge d'Electr. 12, 5 (1885).

[3]) J. f. G. u. W. 28, 685 (1885).

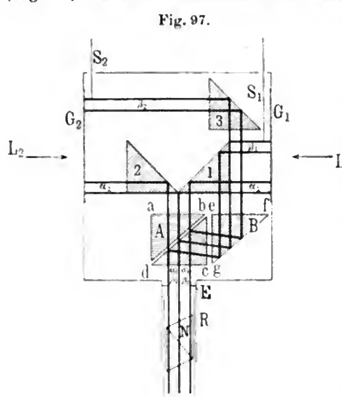
[4]) E. T. Z. 8, 305 (1887).

ε ist zwischen 60 und 75°, r_2 nicht kleiner als $10a$ bis $15a$ zu wählen; R muß auf 1 Proz. sicher bestimmt sein und $K:\left(1 + \frac{RK\varphi}{r_2^2}\right)$ darf nicht größer als 3 werden.

b) Mischungsphotometer von Grosse[1]).

Prinzip des Photometers. Die Hauptbestandteile sind ein Glansches Luftprisma A und ein modifiziertes Dovesches Prisma B (Fig. 97). Fällt ein Strahlenbündel senkrecht auf die Kathetenfläche ab von A, so gehen nur die außerordentlichen, im Hauptschnitt schwingenden Strahlen durch die Luftschicht hindurch und treten senkrecht zu cd heraus, während die ordentlichen durch totale Reflexion beseitigt werden. Von den senkrecht auf die Kathetenfläche ef des Prismas B fallenden Strahlen gehen die außerordentlichen durch die Hypotenusenfläche fg hindurch, während die ordentlichen an ihr total reflektiert werden. Die letzteren werden an der Luftschicht des Prismas A nochmals reflektiert und treten ebenfalls senkrecht zu cd aus A wieder heraus. Es können also zwei senkrecht zueinander polarisierte Strahlenbündel nebeneinander gelegt bzw. miteinander gemischt werden.

Fig. 97.



Beschreibung des Photometers in der Anordnung von Krüss[2]). Das Photometergehäuse enthält außer den Prismen A und B noch die drei Reflexionsprismen 1, 2 und 3 und ist seitlich durch zwei aus demselben Stück geschnittene matte Gläser G_1 und G_2 geschlossen, welche durch L_1 und L_2 in den Entfernungen r_1 und r_2 senkrecht beleuchtet werden. Hinten befinden sich zwei Schieber S_1 und S_2 und vorn das Rohr R mit dem Diaphragma E und dem Nicol N. Durch Abstandsänderungen wird unter Benutzung einer geraden Photometerbank auf gleiche Helligkeit eingestellt.

Meßmethoden. 1. Gegenseitige Mischung. S_1 und S_2 haben dann die in Fig. 97 gezeichnete Stellung. Das von G_1 kommende

[1]) Z. f. Instrk. 7, 129 (1887); 8, 95 (1888). E. T. Z. 9, 151 (1888).
[2]) Z. f. Instrk. 8, 347 (1888).

Strahlenbündel α_1 wird durch das Prisma 1, das von G_2 kommende Strahlenbündel α_2 durch 2 auf A gelenkt. Außerdem gelangen von G_1 und G_2 noch die Lichtbündel β_1 und β_2 zur Wirkung, welche nach Reflexion in dem Prisma 1 bzw. 3 auf B fallen. Die linke Hälfte des Gesichtsfeldes wird also durch α_2 und β_1, die rechte Hälfte durch α_1 und β_2 erleuchtet.

Bezeichnet D das Durchlässigkeitsvermögen des Systems für die Strahlen α_1 und α_2, D' dasjenige für die Strahlen β_1 und β_2, und φ bei Einschaltung des Analysators N den Winkel zwischen den Hauptschnitten von A und N, so ist, abgesehen von einem konstanten Proportionalitätsfaktor, die Helligkeit, welche das Gesichtsfeld erlangt durch

Bündel	Ohne Analysator	Mit Analysator N
α_2	$D\,\frac{J_2}{r_2^2}$	$D\,\frac{J_2}{r_2^2}\cdot\cos^2\varphi$
α_1	$D\,\frac{J_1}{r_1^2}$	$D\,\frac{J_1}{r_1^2}\cdot\cos^2\varphi$
β_2	$D'\,\frac{J_2}{r_2^2}$	$D'\,\frac{J_2}{r_2^2}\cdot\sin^2\varphi$
β_1	$D'\,\frac{J_1}{r_1^2}$	$D'\,\frac{J_1}{r_2^2}\cdot\sin^2\varphi$

Nach Einstellung auf gleiche Helligkeit ist ohne, sowie mit N

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2}\cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Beweis: Z. B. ohne N erhalten wir

$$D\frac{J_2}{r_2^2} + D'\frac{J_1}{r_1^2} = D\frac{J_1}{r_1^2} + D'\frac{J_2}{r_2^2},$$

so daß

$$\frac{J_2}{r_2^2}(D - D') = \frac{J_2}{r_1^2}(D - D'),$$

woraus durch Division mit $(D - D')$ Gleichung 2) sich ergibt.

Die einfache Gleichung 2) rührt daher, daß das Mischungsverhältnis auf beiden Hälften des Gesichtsfeldes dasselbe ist. Ohne N ist es $D:D'$, also konstant; mit N ist es $D\cos^2\varphi : D'\sin^2\varphi$, also mit φ veränderlich. Sind bei einer Stellung von N beide Hälften des Gesichtsfeldes gleich hell, so sind sie es bei jeder beliebigen Stellung von N. N hat hier den Zweck, das Mischungsverhältnis beliebig zu ändern.

2. Einfache Kompensation. Man stößt den Schieber S_2 nieder, wodurch β_2 abgeblendet wird. Alsdann ist ohne N bzw. mit N

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2}\left(1 - \frac{D'}{D}\right)J_1 \text{ bzw.} = \frac{r_2^2}{r_1^2}\left(1 - \frac{D'}{D}tg^2\varphi\right)J_1 \quad . \quad . \quad 3)$$

Durch N wird hier nur auf der linken Seite das Mischungsverhältnis

geändert. D'/D wird bestimmt, indem man noch eine zweite Messung bei doppelter Kompensation ausführt.

Ebenso kann man β_1 durch Niederstoßen von S_1 abblenden.

3. Keine Kompensation. Man schließt durch Niederstoßen von S_1 und S_2 die Lichtbündel β_1 und β_2 aus und erhält mit und ohne Analysator wieder Gleichung 2).

Durch Drehung des Nicols werden in diesem Falle die Helligkeiten beider Hälften des Gesichtsfeldes in gleichem Maße abgeschwächt.

§ 105. Substitutionsverfahren.

Blondel empfiehlt für das Photometrieren von Bogenlicht die Anwendung einer Vergleichslichtquelle, z. B. einer Acetylenlampe, deren Licht weißlicher als das der gewöhnlich benutzten Lampen ist. Besser noch für diesen Zweck ist die Benutzung einer kleinen, mäßig beanspruchten Metallfadenlampe, z. B. einer Osmiumlampe, deren Licht mit dem Acetylenlicht nahezu gleichfarbig ist. Eine solche Lampe leistet auch für das Photometrieren des Gasglühlichtes wesentliche Dienste. Übrigens sind Vergleichslampen, z. B. normal brennende Kohlenfadenlampen, schon lange in der Technik im Gebrauch, und zwar nicht nur, weil sie sich besser als die Einheitslampen zu längeren Versuchen eignen, sondern auch weil sie weißlicher als die Hefnerlampe brennen (vgl. S. 153).

Dieses Substitutionsverfahren stimmt praktisch mit dem unter a) und b), S. 231 bis 233 mitgeteilten überein, da auch dort durch Einführung der farbigen Mittel gleichsam eine weißlichere Lichtquelle von allerdings verringerter Lichtstärke eingeführt wird.

§ 106. Direkter Vergleich.

a) Allard verringert die Helligkeit der relativ großen Vergleichsfelder, indem er durch Blinzeln mit den Augen die wirksame Pupillenöffnung verkleinert, bis die Felder farblos erscheinen, bis also die farbenempfindlichen Zapfen ausgeschaltet sind. Es ist klar, daß das so gewonnene Verhältnis der Lichtstärken — Kries [1]) und Polimanti [2]) nennen diese Lichtstärken Dämmerungswerte — mit Rücksicht auf das Purkinjesche Phänomen nicht mit demjenigen übereinstimmt, welches man bei hinreichend starker Beleuchtung erhält. Überdies ist die Empfindlichkeit gegen Helligkeitsunterschiede bei sehr geringer Helligkeit sehr klein.

b) Lépinay und Nicati (Anm. 1, S. 230) benutzen kleine Felder, welche unter einem Gesichtswinkel von höchstens 45′ erscheinen. Als-

---

[1]) Abh. z. Physiol. d. Gesichtsempfindungen v. J. v. Kries, Leipzig 1902, S. 138.

[2]) Ebenda, S. 83.

dann soll die Empfindlichkeit des Auges gegen Färbungsunterschiede gering sein.

c) Wild benutzt sein Polarisationsphotometer (S. 217). Allerdings verschwinden beim Vergleich verschieden gefärbter Lichtquellen die Interferenzfarben im Polariskop bei keiner Stellung des Polarisators P ganz, indem, wenn für eine gewisse Farbe die Bedingung der Neutralisation erfüllt ist, sie für die anderen nicht zugleich erfüllt sein wird. Man findet indessen beim Drehen von P stets, daß die übrig bleibenden Interferenzfarben bei einer gewissen Stellung von P ein Minimum der Helligkeit erreichen. Alsdann neutralisieren sich offenbar die hellsten Teile der Spektren beider Lichtquellen. Aus dieser Minimalstellung läßt sich das Lichtstärkenverhältnis der für das Auge hellsten Strahlen beider Lichtquellen berechnen. Da die hellsten Strahlen in den Spektren der gewöhnlichen weißen Lichtquellen diejenigen an der Grenze von gelb und grün sind, so stimmt dies Verfahren praktisch mit dem von Crova (S. 232) angegebenen überein.

d) Grosse hat seinem Mischungsphotometer später noch eine Soleilsche Doppelplatte hinzugefügt. Auch in diesem Falle werden fast ausschließlich die hellsten Strahlen verglichen.

e) Methode von Lummer und Brodhun. Beim Lummer-Brodhunschen Gleichheitsphotometer verschwindet für gleichfarbige Lichtquellen die Grenze zwischen den beiden Vergleichsfeldern, also der Rand des elliptischen Feldes vollkommen. Dasselbe gilt auch beim Kontrastphotometer für die Trennungslinie in der Mitte des Gesichtsfeldes. Bei ungleichfarbigen Lichtquellen verschwindet die Grenze auch bei diesen Photometern natürlich nicht; wohl aber wird sie für ein gewisses Verhältnis der Abstände der Lichtquellen vom Photometerschirm möglichst undeutlich. Dieses Undeutlichwerden der Grenze wird als Kriterium *gleicher Helligkeit* angesehen. Nach diesem Kriterium stellen verschiedene Beobachter auch bei größeren Farbenunterschieden verhältnismäßig gleich ein. Bei nicht zu großen Färbungsdifferenzen läßt sich auch noch das Kontrastprinzip verwerten.

f) Methode von Brücke. (Anm. 1, S. 183.) Dieselbe ist der eben erwähnten ähnlich. Brücke benutzt sein S. 183 beschriebenes Photometer und nimmt für den Vergleich verschiedenfarbiger Lichtquellen Verringerung der scheinbaren Breite der einzelnen Streifen des Gesichtsfeldes zu Hilfe, indem er entweder in größere Entfernungen geht, dabei für vollkommen gute Akkommodation durch Brillengläser sorgend, oder indem er das streifige Gesichtsfeld durch einen umgekehrten Operngucker in verkleinertem Bilde betrachtet. Sodann hat man die Abstände r_1 und r_2 des Photometers von den zu vergleichenden Lichtstärken L_1 und L_2 so lange zu verändern, bis die Grenze zwischen den aufeinander folgenden Streifen bei verhältnismäßig größtem Netzhautbilde, also unter dem verhältnismäßig größten Sehwinkel, undeut-

lich wird. Alsdann sind nach Brückescher Definition die beiden Streifensysteme *gleich hell.*

Ferner macht Brücke darauf aufmerksam, daß sich auch der Lummer-Brodhunsche Gleichheitswürfel für seine Methode verwerten läßt, wenn man in die Hypotenusenfläche *rs* des Prismas *A* (Fig. 55, S. 175) eine geeignete Zeichnung graviert. Bei dieser Anordnung erhält man unter noch günstigeren Bedingungen als bei dem Brückeschen Photometer ein Gesichtsfeld, bei welchem das eine Feld, nämlich die Zeichnung, in der Farbe der einen Lichtquelle auf einem das zweite Feld bildenden Grunde leuchtet, welcher die Farbe der anderen Lichtquelle hat. Man hat dann eine Einstellung zu machen, bei welcher die Details der Zeichnung bei verhältnismäßig größtem Sehwinkel verschwinden. Hierbei hat man die Lupe in Fig. 55 durch eine pankratische zu ersetzen, um dem Netzhautbilde verschiedene Größen geben zu können.

B. Methode gleicher Sehschärfe.

§ 107. Sehschärfenprinzip.

Unter der *Sehschärfe* versteht man die Fähigkeit der Netzhaut, kleine Gesichtsobjekte erkennen zu können. Die Sehschärfe wird durch den reziproken Wert des Winkels gemessen, unter welchem man einen bestimmten Gegenstand (Sehzeichen) sehen muß, um seine Form eben deutlich erkennen zu können. Sie wird gewöhnlich gleich 1 angenommen, wenn dies unter einem Winkel von 1′ geschieht. Das Netzhautbild hat dann die Länge von 0,004 mm, welche ungefähr der Dicke der Zapfen der macula lutea entspricht. Als Sehzeichen verwendet Snellen schwarze Buchstaben und Häkchen von verschiedener Größe auf weißem Grunde, Lépinay und Nicati (Anm. 1, S. 230) drei horizontale schwarze Striche auf weißem Grunde, welche je 5 mm lang, 1 mm dick und 1 mm voneinander entfernt sind.

Wenn man eine mit Sehzeichen bedeckte Fläche mit Licht irgend welcher Art sehr schwach beleuchtet, so muß man sich den Sehzeichen stark nähern, um sie gerade deutlich zu unterscheiden; die Sehschärfe ist dann also verhältnismäßig sehr gering. Wenn man die Beleuchtung alsdann allmählich verstärkt, so muß man sich mehr und mehr entfernen, um wieder denselben Grad der Deutlichkeit zu erlangen. Die Sehschärfe nimmt also zu, und zwar zuerst ziemlich schnell, dann immer langsamer, wird für einen großen Helligkeitsbereich konstant und nimmt erst bei blendender Helligkeit wieder ab.

W. v. Siemens[1]) war wohl der erste, der die Behauptung (oder besser Definition) aufstellte, daß vom Standpunkte der Praxis die Be-

[1]) Wied. Ann. 2, 547 (1877).

leuchtungen zweier verschiedenfarbiger Flächen nicht dann als gleichwertig anzusehen seien, wenn die Flächen dem Auge als gleich hell erscheinen, sondern erst dann, wenn auf ihnen angebrachte Sehzeichen gleich deutlich erkennbar sind. Mit anderen Worten: er will für den Vergleich von Lichtquellen verschiedener Färbung die Einstellung auf gleiche Helligkeit durch eine Einstellung auf *gleiche Sehschärfe* ersetzt wissen.

Wenn man also zwei dicht nebeneinander befindliche, mit gleichen Sehzeichen versehene Flächen von je einer der beiden zu vergleichenden Lichtquellen L_1 und L_2 unter gleichen Einfallswinkeln beleuchtet und die Entfernungen r_1 und r_2 so lange ändert, bis man mit gut akkommodiertem Auge die Zeichen in gleicher Schärfe sieht, so erhält man das Lichtstärkenverhältnis nach obiger Definition aus

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot J_1.$$

Da sich bei geringer Helligkeit die Sehschärfe mit der Helligkeit schnell ändert, so muß man, um empfindliche Einstellungen zu machen, bei geringer Helligkeit messen. Dies ist aber ein erheblicher Übelstand, da sich dann das Purkinjesche Phänomen einstellt. Überdies ist nach Brodhun[1]), selbst bei geringer Helligkeit, die Einstellungssicherheit eine so geringe, daß man eine große Anzahl von Einstellungen machen und aus ihnen das Mittel nehmen muß.

Die nach dieser Methode gefundenen Lichtstärkenwerte stimmen nach Lépinay und Nicati nicht mit der nach der Methode der gleichen Helligkeit gefundenen überein, da das Auge, um auf dieselbe Sehschärfe zu gelangen, bedeutend größerer Mengen blauen als roten Lichtes bedarf. Da das Bogenlicht reicher an brechbaren Strahlen als das Gaslicht ist, so würde hiernach also die Sehschärfenmethode für das Bogenlicht im Vergleich zum Gaslicht zu ungünstige Werte liefern. Die Ergebnisse von Lépinay und Nicati sind jedoch nicht sichergestellt. Vielmehr ist anzunehmen, daß man nach der Sehschärfenmethode nicht wesentlich andere Werte als nach den von Lummer und Brodhun sowie von Brücke angegebenen Methoden finden wird. Denn auch bei den letzteren Methoden ist die Grenze zwischen den aneinanderstoßenden Feldern als ein Sehzeichen anzusehen; allerdings wird hier nicht auf gleiche Deutlichkeit, sondern auf möglichst große Unschärfe eingestellt.

Die Sehschärfenmethode wurde außer von Lépinay und Nicati u. a. auch von Crova und Lagarde (S. 255), Langley (S. 256), Brücke (Anm. 1, S. 183), Hähnlein (Anm. 4, S. 202), Simonoff (Anm. 5, S. 213) und Weber (S. 242) verwandt.

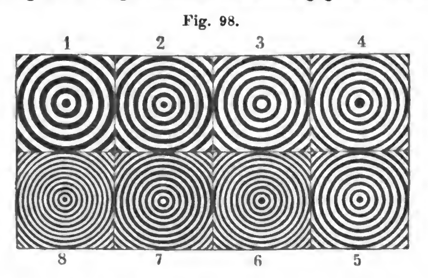
---

[1]) J. f. G. u. W. 34, 594 (1891).

§ 108. Methoden von Weber [1]).

Weber bedient sich hierbei seines Milchglasphotometers (§ 87) und setzt in den Okularteil den in Fig. 64a, S. 185 sichtbaren Schieber ein, welcher drei runde Öffnungen besitzt; die eine ist frei, die zweite mit einem roten, die dritte mit einem grünen Glase verschlossen, so daß man je nach der Stellung des Schiebers mit einer roten oder grünen Glasplatte oder ohne dieselbe messen kann. Als Sehzeichen dienen ihm die in Fig. 98 in vergrößertem Maßstabe angegebenen Zeichnungen,

Fig. 98.



die aus ringförmig schraffierten Feldern abnehmender Feinheit bestehen und auf Milchglasplatten in geeigneter Verkleinerung photographiert werden, so daß sie nur etwa den dritten Teil der einen Hälfte der Platten einnehmen. Es bleibt so noch auf den Platten genügend Raum übrig für die Einstellung auf gleiche Helligkeit.

Erste Methode. Sie setzt sich aus zwei Messungen zusammen.

Messung 1. Man beleuchtet die in den drehbaren Tubus B eingeschobene Milchglasplatte 3 (bzw. 3 + 4, ...) durch die zu messende Lampe L, schlägt vor das Auge die rote Glasplatte und bestimmt das Verhältnis der Lichtstärken von L und der Hefnerlampe für diese rote Strahlengattung als

$$Ro = C_3\, r^2/r_a^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

wo C_3, r und r_a die in Gleichung 1), S. 186 angegebene Bedeutung haben. Alsdann ist die gesuchte, in Hefnerkerzen ausgedrückte Lichtstärke [2])

$$J = k\, Ro \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

wo k durch folgende Sehschärfenmessung gefunden wird.

Messung 2. Zwei völlig gleiche Milchglasplatten a und b mit den erwähnten Sehzeichen werden außerhalb des Photometers dicht nebeneinandergestellt und von hinten derart beleuchtet, daß a nur von einer Benzinkerze von beliebiger, aber konstanter Höhe und b nur von L Licht erhält. Zunächst wird a so stark beleuchtet, daß man beim Ver-

[1]) Wied. Ann. 20, 326 (1883). E. T. Z. 5, 166 (1884).

[2]) Entsprechend verfährt man bei der Bestimmung der Beleuchtung.

schieben der Milchglasplatte G_a die Ablesung r'_a (= etwa 25 cm) erhält, wenn man B ohne die Platten 3... auf den neben der Zeichnung liegenden Teil von a richtet und in der gewöhnlichen Weise photometriert. Hierauf ändert man die Beleuchtung von b so lange, bis man, abwechselnd auf a und b blickend, in beiden Zeichnungen genau dieselben Details, die folgenden aber nicht mehr erkennt. Sodann photometriert man den neben der Zeichnung liegenden Teil von b mit vorgeschlagenem roten Glase; ergibt sich hierbei die Einstellung r''_a, so ist

$$k = \frac{r_a''^2}{r_a'^2} \qquad 3)$$

k ist für Lichtquellen, deren Farbe rötlicher als die der Benzinkerze ist, kleiner als 1, für solche, deren Farbe weißlicher ist, größer als 1.

Zweite Methode. Da die Einstellung auf gleiche Sehschärfe sehr unsicher ist, so schlägt Weber noch ein zweites Verfahren vor, welches die Bestimmung nach der Sehschärfenmethode umgeht und sich an das von Lépinay und Nicati benutzte Verfahren (S. 234) anlehnt. Er macht nämlich außer der vorher erwähnten Messung 1 noch eine Einstellung mit grünem Glase. Das so gefundene Lichtstärkenverhältnis sei Gr. Dann bestimmt er den Quotienten Gr/Ro, entnimmt aus der Tabelle VI (Anhang) den zugehörigen Wert k und berechnet J nach Gleichung 2).

Der erste Teil der Tabelle bis $k = 1,46$ wurde von Weber aus Messungen berechnet, die Schumann[1]) an einer Reihe von verschieden stark beanspruchten elektrischen Glühlampen angestellt hat; die übrigen Zahlen wurden empirisch ermittelt.

Beispiel: Es sei $Ro = 14,7$; $Gr = 18,1$; alsdann ist

$$\frac{Gr}{Ro} = \frac{18,1}{14,7} = 1,23.$$

Diesem Werte entspricht in der Tabelle $k = 1,17$, so daß

$$J = 14,7 \cdot 1,17 = 17,2.$$

Kontrolle der Tabelle. Für genauere Messungen ist es notwendig, für jede zu untersuchende Lichtart die Richtigkeit der Tabelle zu kontrollieren. Zu diesem Zwecke führt man zunächst die vorher erwähnte Messung 2 aus und photometriert sodann b noch mit grünem Glase; die letztere Einstellung sei r'''_a. Alsdann ist

$$\frac{Gr}{Ro} = \frac{r_a''^2}{r_a'''^2} \qquad 4)$$

und der für diese Lichtart gültige Faktor ergibt sich aus Gleichung 3).

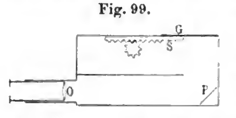
Beispiel: Es sei für $r'_a = 25$ cm gefunden $r''_a = 28,9$ cm; $r'''_a = 23,6$ cm; alsdann ist $\frac{Gr}{Ro} = 1,50$; $k = 1,34$.

[1]) E. T. Z. 5, 220 (1884).

§ 109. Beleuchtungsmesser von Houston und Kennelly[1]).

Ein Kasten (Fig. 99) ist oben durch eine Milchglasplatte G geschlossen, welche in die Fläche gebracht wird, deren Beleuchtung man messen will. G beleuchtet die im Kasten angebrachte schräge Fläche P, welche mit Sehzeichen bedeckt ist. Der Beobachter sieht mit der Lupe O auf P und ändert, indem er eine undurchsichtige Platte S mittels Zahntriebes verschiebt, die wirksame Öffnung G so lange, bis die Sehzeichen gerade deutlich zu sehen sind. An einer Teilung, längs welcher S verschoben wird, kann man unmittelbar die auf G herrschende Beleuchtung ablesen. Die Teilung wird im Dunkelzimmer mittels einer Normallampe empirisch geeicht.

Fig. 99.



C. Flimmerphotometrie.

§ 110. Flimmerprinzip.

Wenn ein Photometerschirm in verhältnismäßig langsamem Wechsel durch zwei gleichfarbige Lichtquellen beleuchtet wird, und die von den Lichtquellen erzeugten Beleuchtungen voneinander verschieden sind, so hat ein auf den Photometerschirm blickendes Auge die unangenehme Empfindung des *Flimmerns* (S. 205). Dieselbe Empfindung zeigt sich, wenn abwechselnd das Licht von zwei aneinanderstoßenden, ungleich beleuchteten Feldern ins Auge gelangt. Das Flimmern kann man natürlich zum Verschwinden bringen, wenn man die Zahl der in einer Sekunde erfolgenden Wechsel (Wechselzahl) erhöht oder auch dadurch, daß man die Beleuchtungen durch ein optisches Verfahren einander gleich macht. Auch beim Vergleich von Lichtquellen, deren Färbung sehr verschieden ist, kann man ein Aufhören des Flimmerns durch Änderung der Beleuchtungen bewirken. Rood[2]) nimmt nun auch in diesem Falle das Verschwinden des Flimmerns als Kriterium der *Gleichheit der Beleuchtungen* an. Wenn die Strahlen beider Lichtquellen L_1 und L_2 unter denselben Einfallswinkeln auf den Schirm auftreffen und das Flimmern für die Abstände r_1 und r_2 aufhört, so gilt wieder

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} J_1.$$

Nach diesem Prinzip sind die in § 111 bis 113 beschriebenen Apparate gebaut.

Polimanti (Anm. 2, S. 238) hat mittels des Flimmerprinzips verschiedene Stellen des Spektrums eines Triplexbrenners im Vergleich

[1]) Electrical World 25, 309 (1895). Z. f. Bel. 1, 164 (1895).
[2]) Sill. J. (3) 46, 173 (1893).

zu weißem Tageslicht untersucht; die auf diese Weise gefundenen Werte nennt er Flimmeräquivalenzen, Krüss Flimmerwerte. Außerdem bestimmte Polimanti für dieselben Spektralregionen die Dämmerungswerte (S. 238) und die sogenannten Peripheriewerte, d. h. diejenigen Lichtstärkenwerte, welche sich ergeben, wenn man mit den peripherischen Netzhautelementen beobachtet, welche fast nur Stäbchen enthalten. Die Flimmerwerte stimmen nicht mit den Dämmerungswerten, wohl aber verhältnismäßig gut mit den Peripheriewerten überein. Allein dieses Ergebnis hat nur für die physiologische Optik Interesse. Für die praktische Photometrie wäre die Beantwortung der Frage wichtiger gewesen, wie weit die Flimmerwerte mit den nach der Methode der gleichen Helligkeit sich ergebenden Werten übereinstimmen. Abschließende Versuche nach dieser Richtung sind bisher nicht veröffentlicht worden.

§ 111. Flimmerphotometer von Whitman, Rood und Bechstein.

a) Photometer von Whitman.

Bei diesem gewöhnlich Rood zugeschriebenen, von Whitman veröffentlichten Apparate [1] (Fig. 100) dienen als Photometerschirme zwei gegen die Bankachse $L_1 L_2$ unter gleichen Winkeln von etwa 60° geneigte, aus demselben Stück geschnittene, weiße undurchsichtige Kartons C und AB, welche auf der Zeichnungsebene senkrecht stehen. AB (s. Nebenfigur) besteht aus zwei konzentrischen Halbkreisen HAG und HBG von etwa 5 und 8 cm Durchmesser und kann um die durch den Mittelpunkt K der Halbkreise gehende, auf diesen senkrecht stehende Achse in geeigneter Weise gedreht werden. Der durch das Beobachtungsrohr F blickende Beobachter sieht bei der in der Hauptfigur gezeichneten Stellung nur den Rand des Halbkreises GBH, während Schirm C durch AB verdeckt wird. Wenn AB sich um 180° gedreht hat, wird dagegen nur der Schirm C sichtbar, welcher alsdann von dem Rande des kleineren Halbkreises HAG fast berührt wird. Wenn AB in Drehung versetzt wird, sieht das Auge abwechselnd beide Schirme. Durch Verschieben der Vorrichtung wird auf Verschwinden des Flimmerns eingestellt.

Fig. 100.

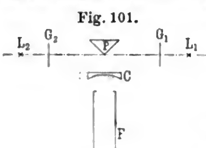
Nach Whitman ist bei gleichfarbigen Lichtquellen die Abweichung zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen selten größer als 1 Proz.; Krüss [2]) fand die größte Abweichung vom Mittel zu 2,1 Proz.

[1]) Phys. Review 3, 241 (1895/1896).
[2]) J. f. G. u. W. 39, 393 (1896).

b) Photometer von Rood[1]).

Auf der Photometerbank (Fig. 101) befinden sich die verschiebbaren elektrischen Glühlampen L_1 und L_2, das als Photometerschirm dienende scharfkantige Ritchiesche Gipsprisma P und die beiden farbigen Glasplatten G_1 und G_2. Zwischen P und dem Beobachtungsrohre F ist die plankonkave Zylinderlinse C eingeschaltet, welche parallel zur Bankachse (etwa 16 mal in der Sekunde) schwingt, so daß das von den beiden Prismenflächen diffus reflektierte Licht abwechselnd in das Beobachtungsrohr gelangt. G_1 und G_2 dienen zur Färbung des Lichtes.

Fig. 101.



c) Photometer von Bechstein.

Ältere Form[2]). Zwischen dem Gipsprisma P (Fig. 102) und der Okularblende A rotiert die keilförmige Linse K. Das von der feststehenden Blende B begrenzte Gesichtsfeld wird mit C als Lupe scharf eingestellt. Bei der Rotation von K beschreibt das von C und K erzeugte, auf dem Gips liegende Bild der Öffnung von A eine Bahn, wie sie Fig. 102a zeigt. Mithin wird das ganze Gesichtsfeld während je einer halben Umdrehung von K durch L_1 bzw. L_2 beleuchtet.

Fig. 102.

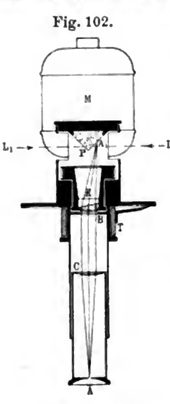
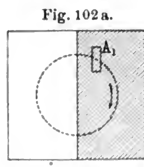
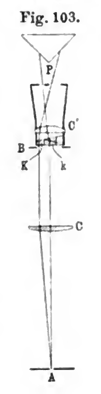


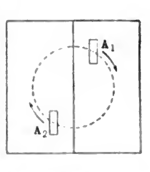
Fig. 102a.



Neuere Form[3]). Bechstein ersetzt die keilförmige Linse K durch eine plankonvexe Linse C' und eine Keilkombination $K\,k$ (Fig. 103). Die letztere besteht aus zwei konzentrisch angeordneten Glaskeilen K und k mit gleichen brechenden Winkeln, welche miteinander derart verbunden sind, daß die Keilwinkel entgegengesetzte Lage haben. Durch K und k werden zwei gleich weit abgelenkte,

Fig. 103.





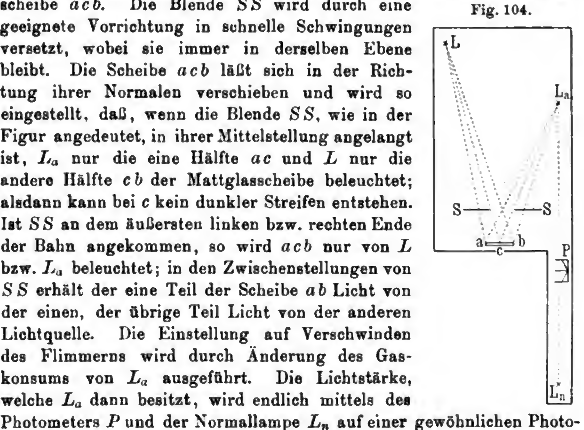
[1]) Sill. J. (4) 8, 194 (1899). — [2]) Z. f. Instrk. 25, 45 (1905). — [3]) Ebenda 26, 249 (1906).

diametral gegenüberliegende Bilder A_1 und A_2 der Öffnung von A auf dem Gipsschirm P erzeugt (Fig. 103a). Demnach sieht man während einer halben Umdrehung von KkC' den kreisförmigen Teil k des Gesichtsfeldes im Lichte von L_1, den ringförmigen Teil K im Lichte von L_2, während der zweiten Hälfte der Umdrehung den Kreis im Lichte von L_2, den Ring im Lichte von L_1 leuchten. Durch die Einführung der *beiden* nebeneinander liegenden Flimmererscheinungen soll die Genauigkeit der Einstellung erhöht werden.

§ 112. Flimmerphotometer von Simmance und Abady.

a) Modell 1 [1]. L (Gasglühlicht) und L_a (Argandbrenner) beleuchten durch die Blende SS (Fig. 104) hindurch die Mattglasscheibe acb. Die Blende SS wird durch eine geeignete Vorrichtung in schnelle Schwingungen versetzt, wobei sie immer in derselben Ebene bleibt. Die Scheibe acb läßt sich in der Richtung ihrer Normalen verschieben und wird so eingestellt, daß, wenn die Blende SS, wie in der Figur angedeutet, in ihrer Mittelstellung angelangt ist, L_a nur die eine Hälfte ac und L nur die andere Hälfte cb der Mattglasscheibe beleuchtet; alsdann kann bei c kein dunkler Streifen entstehen. Ist SS an dem äußersten linken bzw. rechten Ende der Bahn angekommen, so wird acb nur von L bzw. L_a beleuchtet; in den Zwischenstellungen von SS erhält der eine Teil der Scheibe ab Licht von der einen, der übrige Teil Licht von der anderen Lichtquelle. Die Einstellung auf Verschwinden des Flimmerns wird durch Änderung des Gaskonsums von L_a ausgeführt. Die Lichtstärke, welche L_a dann besitzt, wird endlich mittels des Photometers P und der Normallampe L_n auf einer gewöhnlichen Photometerbank bestimmt.

Fig. 104.



Die Anwendung einer Zwischenlichtquelle L_a macht, wie Krüss mit Recht hervorhebt, den Apparat unnötig kompliziert.

b) Modell 2 [2]. Der Apparat ist als Winkelphotometer nach Hartley (S. 285) konstruiert und besitzt als wichtigsten Bestandteil einen Photometerkörper, welcher mit dem bereits vorher von Krüss angegebenen Körper A (S. 248) übereinstimmt.

Simmance und Abady behaupten, daß vier Personen mit verschiedenen Farbensystemen mit diesem Photometer selbst beim Vergleich von

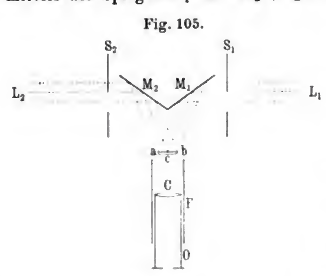
[1]) J. of Gaslighting 82, 664 (1903).
[2]) Phil. Mag. (6) 7, 341 (1904).

Rot und Grün die gleiche Einstellung machten. Diese Einstellung kann, falls keine Versuchsfehler begangen sind, nur eine zufällige gegewesen sein.

§ 113. Flimmerphotometer von Krüss[1]).

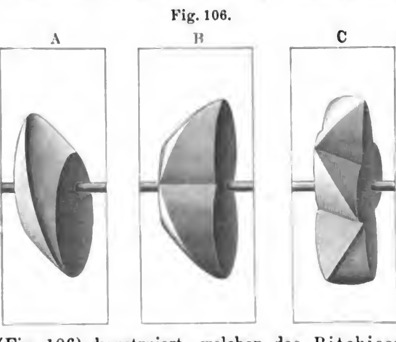
a) Modell 1. Die von L_1 und L_2 kommenden Strahlen fallen mittels der Spiegel M_1 und M_2 (Fig. 105) auf die Mattglasscheibe *acb*.

Fig. 105.



acb ist in das eine Ende des Rohres *F* gefaßt und läßt sich zum Zwecke der Justierung mit *F* mehr oder weniger tief in das Photometergehäuse einschieben. In *F* ist das Okularrohr *O* mit der auf *acb* einzustellenden Lupe *C* verschiebbar. Vor den beiden Lichteinströmungsöffnungen befinden sich die mit sektorenförmigen Ausschnitten versehenen Scheiben S_1 und S_2. Die letzteren sitzen auf einer gemeinsamen Drehungsachse, welche sich in gleicher Höhe mit der optischen Achse des Photometerkopfes befindet. S_1 und S_2 sind so angeordnet, daß eine Lichteinströmungsöffnung geöffnet ist, sobald die andere verschlossen ist, und daß die Ränder der Sekorenausschnitte gleichzeitig vor die Mitten der Lichteinströmungsöffnungen kommen. In der letzteren Stellung müssen sich die Randstrahlen der beiden Strahlenbündel in der Mitte *c* der Mattglasscheibe schneiden, was durch Verschieben von *F* bewirkt wird.

Fig. 106.



b) Modell 2. Außerdem hat Krüss noch die Photometerkörper *A*, *B* und *C* (Fig. 106) konstruiert, welchen das Ritchiesche Prinzip des Keilphotometers zugrunde liegt. *A* entsteht, wenn man von den beiden niedrigen Kegelstumpfen I und II (Fig. 106 a), deren Mantelflächen

[1]) J. f. G. u. W. 47, 129 (1904). Z. f. Instrk. 25, 98 (1905).

unter 45° gegen die Grundflächen geneigt sind, die Stücke *abc* und *def* abtrennt und die übrig bleibenden Teile mit den elliptischen Schnittflächen *ab* und *de* aneinander legt; natürlich kann *A* auch aus einem Stücke hergestellt werden. Läßt man den Körper *A* um seine Achse, welche zu der Achse der Photometerbank parallel ist, rotieren, so nimmt der Beobachter, welcher auf den durch die Bankachse gehenden Umfang der Scheibe blickt, abwechselnd die Beleuchtung der beiden geneigten Flächen wahr. Da die Grenze zwischen den letzteren nach 360° denselben Rand der Scheibe erreicht, so erfolgt bei einer Umdrehung also ein zweimaliger Wechsel. Um eine genügende Wechselzahl zu erzielen, müßte man also ein Laufwerk benutzen. Die Photometerkörper *B* und *C* gestatten einen Handbetrieb, da der Wechsel vier- bzw. achtmal bei einer Umdrehung erfolgt.

Fig. 106a.

c) Versuchsergebnisse. Mittels des in Fig. 105 dargestellten Flimmerphotometers fand Krüss bei Benutzung einer Hefnerlampe und eines Gasglühlichtapparates folgendes. Bei ganz langsamer Drehung unterscheidet man deutlich die Aufeinanderfolge eines rötlichen und bläulichen Streifens mit schwach verwaschener Grenze zwischen beiden. Steigert man die Umdrehungsgeschwindigkeit allmählich, so kann man bald die einzelnen Färbungen nicht mehr unterscheiden; es entsteht der Eindruck der Mischfarbe; aber die Empfindung des Helligkeitswechsels, des Flimmerns, besteht noch fort, bis auch diese bei weiterer, indessen nicht zulässiger Steigerung der Geschwindigkeit aufhört.

Bei zu geringer Geschwindigkeit hört das Flimmern überhaupt nicht auf; man findet dann bei Verschiebung des Photometers nur eine Stelle der Bank, wo es ein *Minimum* ist. Bei zu großer Geschwindigkeit kann man auf einer mehr oder minder langen Strecke der Photometerbank kein Flimmern wahrnehmen. Bei einer ganz bestimmten Wechselzahl hört das Flimmern nur an *einer* Stelle der Bank, nämlich in der Mitte der eben genannten Strecke auf. Diese Einstellung ist die genaueste. Die hierzu erforderliche Geschwindigkeit wächst mit der Beleuchtungsstärke. Beim Vergleich eines Gasglühlichtapparates und einer Hefnerlampe, die an den Enden der Bank fest aufgestellt sind, bedarf man also einer geringeren Geschwindigkeit als in dem Falle, wo ein 16kerziger Argandbrenner an die Stelle der Hefnerlampe tritt.

Fig. 107.

In Fig. 107 veranschaulicht Krüss die Abhängigkeit der Drehungsgeschwindigkeit von der Beleuchtungsstärke. Als Abszissen sind die Ablesungen an der Photometerbank und als Ordinaten die entsprechenden Stärken des Flimmerns aufgetragen. Die Kurve *mn* bezieht sich auf eine zu kleine Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheiben S_1 und S_2. Die Kurven-

zweige pr und qs zeigen den Vorgang bei zu großer Drehungsgeschwindigkeit. Bei der richtigen Geschwindigkeit berührt die in der Figur nicht gezeichnete Flimmerkurve die Abszissenachse in t senkrecht unter o.

Siebentes Kapitel.

Spektralphotometrie.

§ 114. Spektroskop.

Zur Erzeugung eines Spektrums bedient man sich gewöhnlich eines Spektroskops mit dem Spaltrohr (Kollimator) S, dem Zerstreuungsprisma P und dem Fernrohr F. Fig. 108 a gibt einen horizontalen Querschnitt bei horizontal aufgestellt gedachter Anordnung, d. h. bei vertikaler Lage der brechenden Kante von P. Fig. 108 b gibt einen schematischen vertikalen Querschnitt, wobei die Ebene der Zeichnung zweimal einen Knick erleidet, nämlich sowohl beim Eintritt wie beim Austritt der Strahlen aus P. S ist am linken Ende durch einen vertikalen Spalt s, an seinem rechten Ende durch das Objektiv O_1 geschlossen, in dessen Brennebene sich s befindet.

Fig. 108 a.

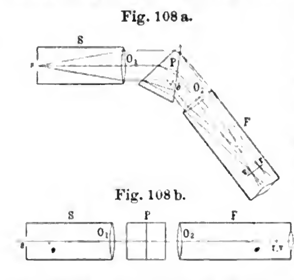


Fig. 108 b.

Beleuchtet man s mit rotem Licht, so wird das von jedem Punkte von s ausgehende Strahlenbündel durch O_1 parallel gemacht, durch P abgelenkt (Ablenkungswinkel δ in Fig. 108 a) und durch das Fernrohrobjektiv O_2 in dessen Brennebene wieder vereinigt. Mithin erhält man von s ein abgelenktes rotes Bild r. Wird s mit violettem Licht beleuchtet, so erhält man ein mehr abgelenktes violettes Spaltbild v. Beleuchtet man s mit weißem Licht, so erhält man die Spaltbilder aller in diesem Lichte enthaltenen Strahlen nebeneinander. Die Gesamtheit aller dieser Spektralbilder ist das *Spektrum*. Wegen der endlichen Breite des Spaltes greifen diese Spaltbilder übereinander. Das Spektrum ist daher um so reiner, je enger der Spalt ist.

In Fig. 108 a liegt die von Rot nach Violett hin gezogene Längsrichtung des Spektrums in der Zeichnungsebene, in Fig. 108 b steht

sie auf der Zeichnungsebene senkrecht. Zu spektralanalytischen und spektrometrischen Zwecken wird am Orte des Spektrums ein Fadenkreuz angebracht. Das letztere wird für Strahlungsmessungen durch eine lineare Thermosäule oder ein Linearbolometer, für photometrische Zwecke durch einen Okularspalt ersetzt, durch welchen ein eng begrenzter Spektralbezirk ausgeschnitten wird. Dreht man das Fernrohr F um eine zur brechenden Kante von P parallele Achse, so erhält man Licht verschiedener Wellenlänge in diesem Okularspalt, und zwar durchläuft die Färbung alle Spektralfarben von Rot zum Violett oder umgekehrt, je nachdem F in der einen oder anderen Richtung gedreht wird. Zur Bestimmung der vom Okularspalte durchgelassenen mittleren Wellenlänge wird s nacheinander mit K-, Li-, Na-, Hg-, Tl-, und H-Licht beleuchtet. Man dreht dann F so, daß nacheinander die Mittellinien der Spaltbilder, also die einzelnen Spektrallinien, welche sich bei unendlich schmalem Spalte ergeben würden, genau durch die Mitte des Okularspaltes gehen, und liest jedesmal an einer Teilung die zugehörige Stellung des Rohres F ab. Darauf trägt man auf Millimeterpapier als Abszissen die abgelesenen Grade, als Ordinaten die zugehörigen Wellenlängen ab und verbindet die einzelnen Punkte durch eine Kurve. Aus dieser Kurve kann man dann die für jede beliebige Wellenlänge erforderliche Einstellung von F ablesen.

Länge einer Spektralregion. Ist dx der Abstand zweier Spektrallinien von den Wellenlängen λ und $\lambda + d\lambda$, so wird

$$l = \frac{dx}{d\lambda}$$

die Länge der Spektralregion für die Wellenlänge λ genannt. Bei einem prismatischen Spektrum nimmt l mit abnehmenden Wellenlängen zu, und infolgedessen liegen z. B. die roten Strahlen dichter als die violetten zusammen. Bei einem normalen Spektrum (z. B. Gitterspektrum) ist l dagegen konstant.

§ 115. Bestimmung der Lichtstärken der verschiedenen Farben einer Lichtquelle.

Wir wollen uns im folgenden mit Lichtquellen L beschäftigen, welche Lichtströme von allen Graden der Wellenlänge aussenden. Von diesen Lichtströmen wollen wir in diesem Paragraphen nur die zwischen den Wellenlängen λ und $\lambda + d\lambda$ liegenden Teile betrachten.

a) Definitionen.

α) Der von einer elementaren Lichtquelle L (Punkt oder Flächenelement) einem in der beliebigen Entfernung r befindlichen Flächenelement s unter dem Einfallswinkel i zugesandte Lichtstrom läßt sich analog Gleichung 7) S. 75 schreiben in der Form

$$\frac{J_\lambda\, s \cos i}{r^2}\, d\lambda \quad \text{. . . . . 1)}$$

Dies gilt auch noch, falls L eine ausgedehnte Lichtquelle ist, für hinreichend große Entfernungen.

J_λ werde als Lichtstärke von L für die Wellenlänge λ bezeichnet.

β) Der Lichtstrom, welcher von dem Flächenelement σ unter dem Ausstrahlungswinkel ε ausgeht und auf ein in der Entfernung r befindliches Flächenelement s unter dem Einfallswinkel i (vgl. Fig. 9, S. 33) auffällt, läßt sich analog Gleichung 4), S. 76 schreiben

$$e_\lambda \frac{s\,\sigma \cos i \cos \varepsilon}{r^2} d\lambda \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

e_λ werde analog dem Emissionsvermögen η_λ (S. 35) als die Flächenhelle von σ für die Wellenlänge λ und den Ausstrahlungswinkel ε bezeichnet.

γ) Sendet eine Lichtquelle L einem Oberflächenelemente s einer durchscheinenden Platte G aus der Entfernung r unter dem Einfallswinkel i den Lichtstrom $J_\lambda s \cos i \, d\lambda / r^2$, so ist analog der ersten Gl. 9), S. 88 die Flächenhelle des s gegenüberliegenden Elementes der Rückseite von G für die Wellenlänge λ und den Ausstrahlungswinkel ε

$$e_\lambda = \frac{t_\lambda J_\lambda \cos i}{r^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

wenn t_λ den Durchlässigkeitskoeffizienten für λ und die Größen i und ε bezeichnet. Für weiße Substanzen (S. 22) ist t_λ unabhängig von der Wellenlänge.

δ) Helligkeit des Spektrums. In jedem Punkte des Spektrums treffen sich eine Anzahl Strahlen verschiedener Wellenlänge infolge des Übereinandergreifens der Spaltbilder der betreffenden Wellenlängen. Die Helligkeit, mit welcher man das Spektrum an derjenigen Stelle, deren mittlere Wellenlänge λ ist, unter dem Einflusse aller hier sich deckenden Strahlen sieht, werde mit h_λ bezeichnet.

Nun ist h_λ 1. der Flächenhelle e_λ des Spaltes für die Wellenlänge λ direkt proportional, 2. der Spaltbreite nahezu [1]) direkt proportional und 3. der Länge l des Spektrums an der Stelle λ umgekehrt proportional; je näher die Spektrallinien aneinanderliegen (wie im Rot), um so größer ist also die Helligkeit.

Wir können demnach setzen:

$$h_\lambda = f_\lambda e_\lambda \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4)$$

wo f_λ der Spaltbreite nahezu proportional, der Länge l umgekehrt

[1]) Nur im Gelbgrünen, also in dem Bezirk, für welches das Auge am empfindlichsten ist (S. 65), findet Brace — Astrophys. J. 11, 6 (1900) — keine Abweichung von der Proportionalität. An den übrigen Stellen kommen nach Capps — Astrophys. J. 11, 25 (1900) — Abweichungen bis zu 10 Proz. vor.

proportional ist und außerdem von dem Lichtverlust abhängt, den die Strahlen durch Reflexion und Absorption im Apparate erfahren.

b) Ableitung von Formeln.

Mittels der bisher beschriebenen Photometer wurde die Gesamtlichtstärke J der zu messenden Lampe L, d. h. die Lichtstärke der Gesamtheit aller Lichtstrahlenarten, durch die Gesamtlichtstärke J_n einer Normallampe L_n gemessen.

Für manche Zwecke ist es von Wichtigkeit, auch die spektrale Zusammensetzung von L zu kennen, d. h. zu wissen, in welchem Verhältnis die Lichtstärken J_λ für die einzelnen Wellenlängen, also die Lichtstärken der roten, gelben, blauen, violetten Strahlen, zueinander stehen.

Lichtstärkenmessungen. Man stellt die zu messende Lampe L geradeaus vor dem Spalte s eines Spektroskops, d. h. in der Verlängerung der Spaltrohrachse, auf und schaltet zwischen L und s möglichst senkrecht zu den Strahlen eine durchscheinende Scheibe G (Mattglas, besser noch Milchglas) ein. Alsdann ist die Flächenhelle e_λ, welche die s zugewandte Rückseite von G in der Richtung der Spaltrohrachse für die Wellenlänge λ besitzt, nach Gleichung 3):

$$e_\lambda = \frac{t_\lambda J_\lambda}{r^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 5)$$

Da der Spalt eine Blende ist, so ist gemäß § 36 die Helligkeit h_λ des Spektrums für die Wellenlänge λ so groß, als ob der Spalt mit der Flächenhelle e_λ leuchtet, also als ob die Platte G unmittelbar vor dem Spalte angebracht wäre; d. h. es ist, wenn wir die Flächenhelle des Spaltes für die Wellenlänge λ mit $\mathfrak{e}_\lambda$ bezeichnen,

$$e_\lambda = \mathfrak{e}_\lambda,$$

so daß nach Gleichung 4)

$$h_\lambda = f_\lambda \mathfrak{e}_\lambda$$

und nach Gleichung 5)

$$h_\lambda = \frac{f_\lambda t_\lambda J_\lambda}{r^2},$$

also

$$J_\lambda = \frac{r^2}{f_\lambda t_\lambda} h_\lambda \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 6)$$

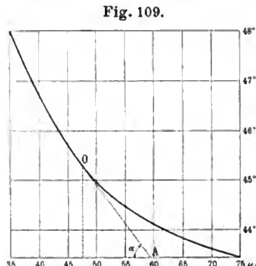
Messungen von Flächenhellen. Handelt es sich um die Bestimmung von Flächenhellen e_λ, welche eine gleichmäßig diffus leuchtende Fläche für die verschiedenen Farben besitzt, so stellt man diese Fläche direkt — also ohne durchscheinende Platte — vor den Spalt. Alsdann leuchtet der Spalt für die Wellenlänge λ mit e_λ und es ergibt sich

$$e_\lambda = \frac{h_\lambda}{f_\lambda} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

Die Aufgabe, die Lichtstärken und Flächenhellen J_λ und e_λ einer Lichtquelle L zu bestimmen, läuft also dahin hinaus, die Helligkeiten der verschiedenen Stellen des von L erzeugten Spektrums, mit anderen Worten: die Verteilung der Helligkeit in diesem Spektrum zu bestimmen.

Reduktion auf das Normalspektrum. Die so für das prismatische Spektrum gefundenen Werte hat man wegen der veränderlichen Länge l der einzelnen Spektralbezirke noch durch Multiplikation mit einem Faktor c auf das Normalspektrum umzurechnen. c wird entweder aus der Cauchyschen Dispersionsformel berechnet[1]), welche die Beziehung zwischen dem Brechungsexponenten und der Wellenlänge angibt, oder empirisch bestimmt. Z. B. konstruiert Langley für die noch in diesem Paragraphen zu besprechenden Versuche eine Kurve (Fig. 109), in welcher die Minimalablenkungswinkel δ (vgl. Fig. 108 a) als Funktionen der zugehörigen Wellenlängen aufgetragen sind. Ist λ eine beliebige Wellenlänge, O der zugehörige Kurvenpunkt, OA die in O an die Kurve gezogene Tangente, α der Winkel, welchen OA mit der Abszissenachse einschließt, so ist für diese Wellenlänge $c = tg\,\alpha$. Auf diese Weise fand Langley

Fig. 109.



für $\lambda = 0{,}35\,\mu$	$\delta = 48^0 00'$	$c = 2{,}28$
0,38	47 10	1,94
0,40	46 42	1,73
0,45	45 42	1,27
0,50	44 58	0,88
0,55	44 28	0,62
0,60	44 07	0,46
0,65	43 50	0,36
0,70	43 38	0,30
0,75	43 26	0,27
0,768	43 22	0,26

Außerdem mußte Langley noch eine zweite Korrektion vornehmen, weil sich das Reflexionsvermögen R_λ des benutzten Silberspiegels stark mit der Wellenlänge änderte. Beispielsweise fand er die Helligkeit für $\lambda = 0{,}55\,\mu$ unkorrigiert in einer willkürlichen Einheit gleich 193,8; da für diese Wellenlänge $R_\lambda = 0{,}82$ war, so war der auf das Normalspektrum reduzierte Wert:

$$\frac{193{,}8 \times 0{,}62}{0{,}82} = 146{,}6.$$

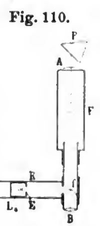
[1]) Lundquist, Pogg. Ann. 155, 146 (1875).

c) Experimentelle Untersuchungen über die Verteilung der Helligkeit im Spektrum eines Körpers.

Die Lösung dieses Problems ist außerordentlich schwierig und unsicher, wie bereits Kap. VI gezeigt wurde.

1. Die ersten derartigen Messungen wurden von Fraunhofer[1]) ausgeführt. Er stellt in das Beobachtungsrohr F eines Spektroskops (Fig. 110) einen gegen die Achse von F unter 45° geneigten Stahlspiegel, dessen scharfe Kante f in der Brennebene des Objektivs A liegt. An das Okularrohr B ist seitlich ein Rohr R angesetzt, in welchem sich eine kleine Öllampe L_a, vor welcher sich die kleine Blende E befindet, verschieben läßt. Der durch das Okular blickende Beobachter sieht in der vom Spiegel nicht bedeckten Hälfte des Gesichtsfeldes einen Teil des Sonnenspektrums; die andere Hälfte wird von dem durch den Spiegel reflektierten Lichte der Öllampe beleuchtet. Man verschiebt die letztere so lange, bis die beiden Hälften des Gesichtsfeldes gleich hell erscheinen. Die Helligkeit des untersuchten Spektralbezirkes wird dem Quadrat der Entfernung zwischen Blende und Spiegelkante umgekehrt proportional gesetzt.

Fig. 110.



2. Vierordt[2]) ersetzt die Skale in seinem Spektralapparat durch einen horizontalen Spalt, der durch eine Petroleumlampe beleuchtet wird. Durch diejenige Fläche des Zerstreuungsprismas, aus welcher die vom Kollimator kommenden Strahlen austreten, wird das von dem erwähnten Spalte ausgehende Licht auf das Spektrum reflektiert, derart, daß oberhalb und unterhalb dieses Bildchens das Spektrum rein sichtbar ist. Mittels Rauchgläser wird dann das Licht der Petroleumlampe so weit geschwächt, daß das Bildchen gerade nicht mehr auf dem Spektrum zu erkennen ist; die Helligkeit der untersuchten Spektralgegend wird dann der Beleuchtung des Spaltes proportional gesetzt.

Beide Methoden sind zwar sehr einfach, aber sehr ungenau.

3. Crova und Lagarde[3]) setzen vor den Spalt ihres Spektralphotometers eine Glasplatte, auf welche eine große Anzahl von feinen, parallelen, zum Spalte senkrechten Linien aufgeritzt oder photographiert sind, so daß das Spektrum von feinen Strichen durchzogen ist. Hinter dem Spalte befindet sich ein fester Nicol und vor dem Prisma ein meßbar drehbarer Nicol, der so lange gedreht wird, bis die Streifen an der betreffenden Stelle des Spektrums gerade aufhören wahrnehmbar zu bleiben. Ist φ die Größe dieses Drehungswinkels aus der Dunkelstellung, so wird die Helligkeit $\sin^2 \varphi$ umgekehrt proportional gesetzt. Nach dieser

---

[1]) Gilb. Ann. **26**, 297 (1817).
[2]) Pogg. Ann. **137**, 200 (1869).
[3]) C. R. **93**, 959 (1881); J. d. Phys. (2) **1**, 162 (1882).

Methode fanden sie bei Reduktion auf das Normalspektrum, wenn das Maximum gleich 100 gesetzt wurde, für Carcellampe und Sonne:

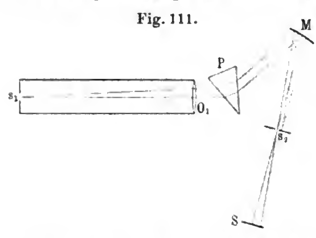
Wellenlänge	740	720	700	680	660	640	620 $\mu\mu$
Carcellampe	0,1	0,7	1,6	5,7	14,0	28,0	52,5
Sonne	—	—	—	0,5	1,5	4,0	10,2

Wellenlänge	600	580	560	540	520	500	480 $\mu\mu$
Carcellampe	94,0	72,5	37,5	23,5	13,0	6,0	1,0
Sonne	23,0	62,5	98,5	30,5	17,2	9,2	3,5

Das Maximum lag für die Carcellampe bei $\lambda = 592\,\mu\mu$, für die Sonne bei $\lambda = 564\,\mu\mu$.

4. Langley[1]) bedient sich eines Spiegelspektroskops (Fig. 111), d. h. eines Spektroskops, bei welchem das Fernrohrobjektiv O_2 (Fig. 108) durch den silbernen Hohlspiegel M ersetzt ist. Das von dem letzteren entworfene Spektrum der Sonne wird auf einem mit einem Spalt s_2 versehenen Schirme aufgefangen. Durch Drehen des Silberspiegels kann s_2 mit den verschiedenen Spektralfarben beleuchtet werden. Das durch s_2 hindurchgehende homogene Licht fällt auf einen Schirm S, welcher senkrecht zu seiner Ebene meßbar verschoben werden kann. Auf S sind als Sehproben Ziffern einer Logarithmentafel angebracht. Das auf S auffallende Licht wird teils durch Verschieben von S, teils durch Regulierung der Spaltweite von s_1, teils mittels eines vor s_1 rotierenden Sektors so lange verändert, bis die kleinen Ziffern eben erkennbar sind. Die Helligkeit der Spektralregion wird der Spaltweite von s_1 und der Größe des Sektors umgekehrt proportional, dagegen dem Quadrate der Entfernung zwischen S und s_2 direkt proportional gesetzt. Die Ergebnisse sind bereits in den Tabellen I und II (S. 64 und 65) mitgeteilt.

Fig. 111.



Vergleich der Lichtstärken gleicher Farben zweier Lichtquellen (eigentliche Spektralphotometrie).

§ 116. Anordnung der photometrischen Vorrichtung.

Da die eben besprochene Bestimmungsweise sehr ungenau ist, so beschränkt man sich meistens darauf, eine Normallampe zum Vergleich heranzuziehen und die roten, gelben . . . Strahlen beider Lichtquellen miteinander zu vergleichen. Kennt man für die Normallampe die Verteilung der Helligkeit im Normalspektrum, so kann man durch diese

[1]) Sill. J. (3) 36, 359 (1888).

vergleichenden Versuche auch für die zu untersuchende Lampe die Verteilung der Helligkeit im Normalspektrum bestimmen.

Das Spektralphotometer muß für diese Vergleiche so eingerichtet sein, daß es von beiden Lichtquellen Spektren erzeugt, derart, daß die gleichfarbigen Bestandteile beider Spektren in einer für die Vergleichung geeigneten Weise nebeneinander fallen. Die verschiedenen, nach diesem Gesichtspunkte gebauten Spektralphotometer unterscheiden sich wie die gewöhnlichen Photometer erstens durch die Vergleichsvorrichtung, mittels welcher die zu vergleichenden Felder zur Berührung gebracht werden, zweitens durch die Meßvorrichtung, mittels welcher auf gleiche Helligkeit dieser Felder eingestellt wird.

Beispiele für Messungen der Lichtstärke (bzw. Flächenhelle) und für Absorptionsmessungen s. § 119, für Messungen des Reflexionsvermögens s. § 120.

§ 117. Vierordts Spektralphotometer [1]).

Vierordt ersetzt den einfachen Spalt s in den Fig. 108 durch einen Doppelspalt, bestehend aus zwei übereinander liegenden Teilen a und b, von denen jedem mittels einer Mikrometerschraube eine genau meßbare Breite gegeben werden kann.

Die eine der beiden miteinander zu vergleichenden Lichtquellen wird geradeaus vor das Kollimatorrohr gestellt und beleuchtet die eine Hälfte des Doppelspaltes, z. B. a. Vor der Spalthälfte b befindet sich ein totalreflektierendes Prisma, welches das Licht der anderen seitlich aufgestellten Lichtquelle in Richtung der Achse des Kollimatorrohres reflektiert. So entstehen zwei übereinanderliegende Spektren, welche mittels einer Okularlupe beobachtet werden. Die Einstellung erfolgt durch Änderung der Spaltbreiten.

Bezeichnen: e_a und e_b die durch die betreffenden Lichtquellen erzeugten Flächenhellen der Spalte a und b für die Wellenlänge λ; s_a und s_b die sich bei der Einstellung ergebenden Spaltweiten von a und b, so wird, wenn auch nicht genau, gesetzt:

$$\frac{e_b}{e_a} = \frac{s_a}{s_b}.$$

Ist die eine der beiden Lichtquellen zu stark, so muß man ihr Licht durch ein Rauchglas abschwächen.

Vierordt benutzte einen einseitig verschiebbaren Doppelspalt; da alsdann in der oberen und unteren Hälfte des Okularspaltes Strahlen von etwas verschiedener Wellenlänge zur Bilderzeugung beitragen [2]), so

[1]) Pogg. Ann. 140, 172 (1870). Die Anwendung des Spektralapparates zur Photometrie der Absorptionsspektren und zur quantitativen Analyse, Tübingen 1873.

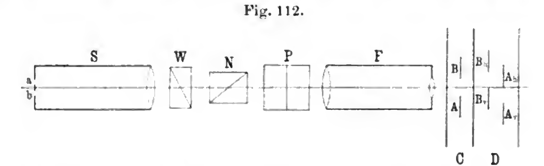
[2]) Vierordt, Wied. Ann. 3, 357 (1878); Dietrich, Die Anwendung des Vierordtschen Doppelspaltes in der Spektralanalyse. Stuttgart 1881.

hat Krüss[1]) einen bilateralen Doppelspalt (S. 200) konstruiert, bei welchem je zwei einander gegenüberliegende Spaltschlitten derartig miteinander verbunden sind, daß sie sich gleichmäßig, aber in entgegengesetzter Richtung bewegen; alsdann stellen sich die beiden Schneiden jeder Spalthälfte stets symmetrisch zur optischen Achse ein.

§ 118. Glansches Spektralphotometer [2]).

Der einfache Spalt s in den Fig. 108 ist durch einen über die Mitte gelegten Steg in zwei Teile, den oberen a und den unteren b, geteilt, und zwischen Kollimator S und Zerstreuungsprisma P[3]) sind ein Wollastonsches Prisma W (Fig. 112) und ein Nicol N eingeschaltet.

Fig. 112.



Ohne W würde man zwei durch einen dunkeln Zwischenraum getrennte Spektren A und B erhalten (Teil C der Fig. 112). W zerlegt die auffallenden Strahlen in zwei senkrecht zueinander polarisierte Komponenten. Mithin treten jetzt an Stelle der zwei Spaltbilder A und B deren vier B_h, B_v, A_h, A_v. In Fig. 112 sind die vier Spektren bei D der Deutlichkeit halber in zwei Ebenen verlegt; in Wirklichkeit liegen sie in derselben Ebene. Durch Auswahl eines Steges von geeigneter Breite oder durch passendes Ausziehen des Spaltrohres S werden die beiden inneren, senkrecht zueinander polarisierten Spektren B_v und A_h an der gewünschten Stelle zur Berührung gebracht, während B_h und A_v abgeblendet werden.

Spalt a werde durch L_2 direkt, Spalt b durch L_1 mittels Reflexionsprismas beleuchtet. Muß man N um den Winkel φ aus der Stellung, in welcher B_v verschwindet, herausdrehen, um gleiche Helligkeit zu erhalten, so ist

$$\frac{e_{2,\lambda}}{e_{1,\lambda}} = k\, tg^2\, \varphi ,$$

wenn $e_{1,\lambda}$ und $e_{2,\lambda}$ die durch L_1 und L_2 erzeugten Flächenhellen von b und a sind. k ist eine der Einheit nahezu gleiche Konstante.

---

[1]) Rep. f. Phys. **18**, 217 (1882); Z. f. analyt. Chem. **21**, 182 (1882).

[2]) Wied. Ann. **1**, 351 (1877).

[3]) Analog Fig. 108 b ist P als ein gewöhnliches Prisma gezeichnet; in Wirklichkeit ist P ein geradsichtiges.

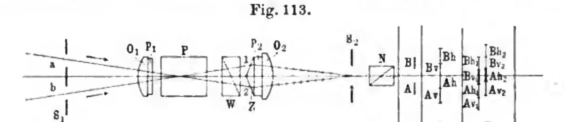
Auch König (§ 119), Trannin[1]), Hüfner[2]), Glazebrook[3]), Crova[4]), Wild[5]), Königsberger[6]) bedienen sich der Polarisation zur Schwächung des Lichtes. Vgl. ferner G. und H. Krüss[7]).

§ 119. Das Spektralphotometer von König[8]).

Das Spektralphotometer in der Neukonstruktion von Martens[9]) ist im Gegensatz zu den vorher aufgeführten ein Spektroskop mit horizontaler brechender Kante des Zerstreuungsprismas. Diese Anordnung beansprucht weniger Raum und gestattet eine bequemere Beobachtung.

a) Beschreibung des Photometers. Fig. 113 gibt einen schematischen Horizontalschnitt. Der Kollimatorspalt s_1 ist durch

Fig. 113.



einen Steg in zwei Spalte *a* und *b* geteilt. An die Objektive O_1 und O_2 sind die Prismen p_1 und p_2 aus Crownglas angekittet, welche die zweimalige Reflexion von Strahlen an den optischen Flächen, die bei der alten Konstruktion sehr störend wirkte, unschädlich machen sollen. Zwischen P und O_2 sind das Wollastonsche Prisma W aus Kalkspat und das an p_2 angekittete Zwillingsprisma Z, ferner zwischen Okularspalt s_2 und Auge das Nicol N eingeschaltet.

Bei der älteren Konstruktion von König war die brechende Kante von P vertikal, und es war W (aus Quarz) zwischen O_1 und P eingeschaltet. Durch geringe Doppelbrechung von P wurde, wie zuerst Ehlers zeigte, der Fehler bewirkt, daß die Schwingungsrichtungen der durch W zerlegten Strahlen nicht genau aufeinander senkrecht standen.

Ohne Z würden, wie beim Glanschen Photometer, von dem Spalte *a* zwei Bilder A_h und A_v, von dem Spalte *b* zwei Bilder B_h und B_v entstehen, wie Teil D der Fig. 113 angibt. Die in Fig. 113 obere Hälfte 1 von Z (in Wirklichkeit ist oben und unten in der Figur rechts

[1]) J. d. Phys. 5, 297 (1876).

[2]) J. f. prakt. Chem. (2) 16, 290 (1877).

[3]) Proc. Cambridge Phil. Soc. 4, 304 (1880—1883) und Practical Physics. von Glazebrook und Shaw p. 341, deutsche Ausg., S. 321.

[4]) Ann. Chim. Phys. (5) 29, 556 (1883).

[5]) Wied. Ann. 20, 452 (1883).

[6]) Z. f. Instrk. 21, 129 (1901); 22, 88 (1902).

[7]) Kolorimetrie und quant. Spektralanalyse, Hamburg und Leipzig (1891).

[8]) Wied. Ann. 53, 785 (1894).

[9]) Verh. d. D. Phys. Ges. 1, 280 (1899); Ann. d. Phys. (4) 12, 984 (1903).

und links) entwirft eine nach unten abgelenkte Spaltbilderreihe B_{h_1}, B_{v_1}, A_{h_1}, A_{v_1}, die untere Hälfte 2 eine nach oben abgelenkte Spaltbilderreihe B_{h_2}, B_{v_2}, A_{h_2}, A_{v_2}. Nur das Licht der zentralen senkrecht zueinander polarisierten Bilder B_{v_1} und A_{h_2} wird vom Okularspalt durchgelassen. Mithin sieht das durch s_2 blickende Auge das Vergleichsfeld 1 mit Licht vom Spalte b, das Vergleichsfeld 2 mit Licht vom Spalte a beleuchtet. Durch Drehung des Nicols N wird auf gleiche Helligkeit der Felder 1 und 2 eingestellt.

Bei gleicher Aufstellung von L_1 und L_2 wie im vorigen Paragraphen, ergibt sich dieselbe Gleichung wie dort, wenn φ der Drehungswinkel aus der Dunkelstellung für das Feld 1 ist.

Bei diesem Photometer bringt man nach dem Vorgange von Maxwell[1]) das Auge möglichst nahe an den Ort des Spektrums und blickt auf das Zwillingsprisma. Hierdurch wird bewirkt, daß das Gesichtsfeld an allen Stellen in demselben, nahezu monochromatischen Lichte leuchtend erscheint. Das letztere ist bei denjenigen Spektralphotometern, wo man auf das Spektrum sieht, selbst bei sehr schmalem Okularspalt nicht streng der Fall.

b) Messungen von Lichtstärken. Mit dem Königschen Spektralphotometer älterer Konstruktion wurden von E. Köttgen[2]) ausgedehnte Versuche nach der Substitutionsmethode ausgeführt. L_a beleuchtet durch ein Mattglas hindurch mittels eines Reflexionsprismas den einen Spalt, z. B. b. Die auf b erzeugte Flächenhelle sei $\mathfrak{e}_{a,\lambda}$. L_1 und L_2 werden nacheinander geradeaus vor den Spalt a in verschiedene Entfernungen gestellt. In den Weg der Strahlen von L_1 und L_2 wird eine ebenfalls feststehende Mattglasscheibe gestellt. Die hierdurch auf a erzeugten Flächenhellen seien $\mathfrak{e}_{1,\lambda}$ und $\mathfrak{e}_{2,\lambda}$. Bedingt L_1 bzw. L_2 den Drehungswinkel φ_1 bzw. φ_2 aus der Dunkelstellung für das von L_a beleuchtete Feld, so ist

$$\mathfrak{e}_{2,\lambda} = k\,\mathfrak{e}_{a,\lambda}\,tg^2\varphi_2\,; \quad \mathfrak{e}_{1,\lambda} = k\,\mathfrak{e}_{a,\lambda}\,tg^2\varphi_1,$$

so daß

$$\frac{\mathfrak{e}_{2,\lambda}}{\mathfrak{e}_{1,\lambda}} = \frac{tg^2\varphi_2}{tg^2\varphi_1}.$$

Nun ist, wenn r_1 und r_2 die Abstände zwischen L_1 bzw. L_2 und dem Mattglase bezeichnen, und t_λ der zugehörige Durchlässigkeitskoeffizient des Mattglases ist:

$$\mathfrak{e}_{2,\lambda} = t_\lambda\,\frac{J_{2,\lambda}}{r_2^2}\,; \quad \mathfrak{e}_{1,\lambda} = t_\lambda\,\frac{J_{1,\lambda}}{r_1^2},$$

so daß

$$\frac{J_{2,\lambda}}{J_{1,\lambda}} = \frac{r_2^2}{r_1^2}\,\frac{tg^2\varphi_2}{tg^2\varphi_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

---

[1]) Phil. Trans. 150, 57 (1860).

[2]) Wied. Ann. 53, 793 (1894).

Ferner wurden entsprechende Versuche für eine konstante Wellenlänge λ_0 angestellt. Sind φ_2' und φ_1' die hierbei gefundenen Drehungswinkel, so ist, wenn man

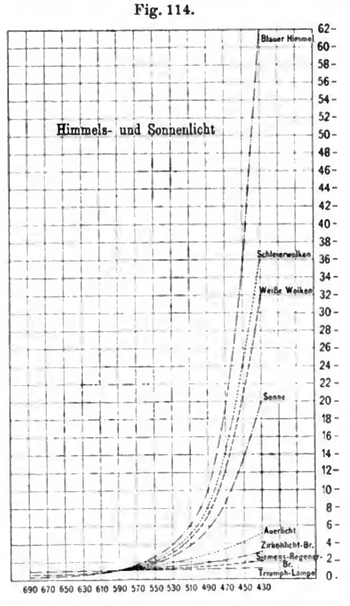
$$P_\lambda = \frac{J_{2,\lambda}}{J_{1,\lambda}} : \frac{J_{2,\lambda_0}}{J_{1,\lambda_0}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

setzt,

$$P_\lambda = \frac{tg^2\varphi_2 \cdot tg^2\varphi_1'}{tg^2\varphi_1 \cdot tg^2\varphi_2'} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

Die Größe P_λ wird die relative spektrale Lichtstärke der Lichtquelle L_2, bezogen auf die Normallampe L_1, genannt.

Fig. 114.



Bei spektralphotometrischen Messungen wird stets die Größe P_λ bestimmt; nur werden von den einzelnen Photometrikern für λ_0 verschiedene Werte, z. B. von Köttgen $\lambda_0 = 589\,\mu\mu$ (Natriumlicht) gewählt.

Messungsergebnisse. Köttgen benutzte als Lichtquelle L_1 eine Hefnerlampe, als Lichtquellen L_2 eine Reihe verschiedener Lichtquellen und trug die für die letzteren gefundenen Werte P_λ als Funktionen der Wellenlänge graphisch auf. Fig. 114 gibt einige dieser Kurven. Andere Kurven beziehen sich auf verschiedene Petroleumlampen. Aus Fig. 114 geht hervor, daß das Sonnen- und Himmelslicht sehr reich an brechbaren Strahlen sind.

Ferner verglich Köttgen die spektralen Flächenhellen von gleichmäßig leuchtenden Lichtquellen L_1 und L_2; hierbei ergab sich für das Verhältnis wieder Gleichung 3). Schließlich wurde auch noch die spektrale Flächenhelle einer Reihe von Lichtquellen L_2, bezogen auf die Hefnerlampe L_1, bestimmt; alsdann muß die rechte Seite von Gleichung 3) noch mit $t_\lambda / t_{\lambda_0}$ multipliziert werden.

Zum Vergleiche seien hier noch die Ergebnisse mehrerer anderer Beobachter mitgeteilt.

O. E. Meyer[1]) untersucht spektralphotometrisch Tageslicht, Sonnenlicht, elektrisches Licht und Gaslicht; z. B. für Bogenlicht, bezogen auf Gaslicht, findet er, wenn $\lambda_0 = 589\,\mu\mu$ gesetzt wird:

	für Rot	Gelb	Grün	Blau	Violett
$J_\lambda =$	0,51	1,00	2,33	3,70	6,67

H. W. Pickering[2]) benutzt eine Art Methvenlampe (S. 109) als Vergleichslampe und erhält:

Farbe Spektrallinie	Rot C	Gelb D	Grün b'	Violett $F\,{}^1/_2\,G$
Kalklicht	59	100	113	285
Gaslicht	74	100	103	125
Englische Kerze	73	100	104	134
Magnesium	50	100	223	1129
Elektrisches Licht . . .	61	100	121	735
Mondlicht	87	100	155	363
Sonne	45	100	250	2971

Vogel[3]) gelangt u. a. zu folgendem Ergebnis:

Wellenlänge	633	600	555	517	486	464	444	426 $\mu\mu$
Petroleum: Sonne	232	175	100	52	27	18	11	10
Petroleum: Bogenlicht .	190	149	100	46	43	32	25	20

Schumann[4]) vergleicht elektrische Glühlampen mit der Benzinkerze für die Wellenlängen 676 $\mu\mu$ (Rot), 615 $\mu\mu$ (Gelb), 557 $\mu\mu$ (Grün), 487 $\mu\mu$ (Blau), 464 $\mu\mu$ (Indigo) und 429 $\mu\mu$ (Violett). Außerdem photometriert er eine elektrische Lampe bei verschiedenen Graden der Beanspruchung, also bei verschiedenen Temperaturen; hierbei findet er:

Arbeit in Watt	$\frac{\text{Rot}}{\text{Grün}}$	$\frac{\text{Indigo}}{\text{Grün}}$
82	0,73	1,70
86	0,69	1,78
92	0,66	2,12
94	0,63	2,43
97	0,62	2,63
111	0,60	2,91
118	0,59	2,94
120	0,58	3,38

[1]) Z. f. angew. Elektr.-Lehre **1**, 320 (1879); **5**, 457 (1883).
[2]) Proc. Amer. Acad. **15**, 236 (1879/1880).
[3]) Berl. Ber. 1877, S. 104; 1880, S. 801.
[4]) E. T. Z. **5**, 220 (1884).

Nichols und Franklin[1]) vergleichen in zehn Spektralregionen Kalklicht, Bogenlicht, Sonnenlicht, Tageslicht, Glühlampen verschiedener Lichtstärke mit einer normalbrennenden 16 kerzigen Glühlampe.

Rogers[2]) stellt Vergleiche zwischen der Lichtstärke des Magnesiumlichtes und derjenigen der Argandlampe an; von $\lambda = 670$ bis $450\,\mu\mu$ steigt das Verhältnis von 0,53 bis 8,77. Das Magnesiumlicht ist also sehr reich an brechbaren Strahlen.

Gaud[3]) vergleicht Bogen- und Glühlampenlicht mit der Sonne.

c) Absorptionsmessungen. Fällt auf eine durchsichtige, absorbierende Substanz von der Dicke d Licht von der Wellenlänge λ, so wird an der Vorderseite der Bruchteil R reflektiert, der Bruchteil $1 - R$ dringt ein; von diesem gelangt infolge von Absorption nur der Bruchteil 10^{-kd} [vgl. Gleichung 8), Anhang 3] zur Rückseite. Hier wird wieder der Bruchteil R reflektiert, der Bruchteil $(1 - R)$ durchgelassen, so daß von der ganzen auffallenden Lichtmenge der Bruchteil D austritt[4])

$$D = (1 - R)^2 \cdot 10^{-kd} \quad \ldots \ldots \quad 4)$$

Bestimmung der Absorptionskonstante k. Man beleuchtet zunächst die beiden Spalte durch je eine der Lichtquellen L_1 und L_2 direkt, d. h. ohne die zu untersuchende absorbierende Substanz einzuschalten. $e_{1,\lambda}$ und $e_{2,\lambda}$ seien die hierdurch erzeugten Flächenhellen der beiden Spalte, und φ der sich bei Einstellung auf gleiche Helligkeit ergebende Drehungswinkel aus der Dunkelstellung für Licht von L_1. Sodann schaltet man in den Weg der Strahlen von L_1 und L_2 eine d_1 bzw. d_2 cm dicke Schicht der zu untersuchenden Substanz; φ' sei der zugehörige Drehungswinkel. Alsdann ist

$$\frac{e_{2,\lambda}}{e_{1,\lambda}} = k\, tg^2 \varphi \quad \ldots \ldots \quad 5)$$

und nach Gleichung 4)

$$\frac{(1 - R)^2 e_{2,\lambda} 10^{-kd_2}}{(1 - R)^2 e_{1,\lambda} 10^{-kd_1}} = k\, tg^2 \varphi' \quad \ldots \ldots \quad 6)$$

Dadurch, daß man zwei Platten derselben Substanz, aber verschiedener Dicke benutzt, hebt sich im Zähler und Nenner von Gleichung 6) der Faktor $(1 - R)^2$ fort; es wird durch diese Anordnung also der Einfluß der Reflexion eliminiert.

Dividiert man Gleichung 6) durch 5), so wird

$$10^{k(d_1 - d_2)} = \frac{tg^2 \varphi'}{tg^2 \varphi} \quad \ldots \ldots \quad 7)$$

[1]) Sill. J. (3) 38, 100 (1889).

[2]) Ebenda (3) 43, 301 (1892).

[3]) C. R. 129, 759 (1899).

[4]) Von den vielfachen inneren Reflexionen an der Hinter- und Vorderfläche der Substanz (vgl. Fig. 2, S. 17) kann hierbei abgesehen werden.

so daß

$$k = \frac{2\,(log\,tg\,\varphi' - log\,tg\,\varphi)}{d_1 - d_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Beispiel. Für zwei grüne Gläser sei $d_1 - d_2 = 0{,}1859$ cm, und es sei für die Wellenlänge 589 $\mu\mu$ gefunden: $\varphi = 34^0\,58'$, $\varphi' = 76^0\,38'$. Alsdann wird $k = 8{,}386$.

Geht also das Licht durch eine 1/8,386 cm dicke Schicht des zu untersuchenden grünen Glases, so gelangt von der eingedrungenen Lichtmenge der zehnte Teil bis zur Rückseite.

Solche Messungen werden fehlerhaft, wenn sich die Lichtquellen während der Messung ändern. Deshalb empfiehlt es sich, statt zweier Lichtquellen eine einzige zu benutzen, welche von derselben Stelle aus auf zwei verschiedenen Wegen Licht auf die beiden Spalthälften sendet. Fig. 115a zeigt eine solche Vorrichtung von Martens. Die Lichtquelle L_a wird in die Nähe eines Beleuchtungsspaltes s gesetzt, von welchem mittels eines Systems von drei Linsen zwei reelle Bilder auf den Eintrittsspalten a und b des Photometers erzeugt werden. Diese Vorrichtung hat die Mängel, daß nur kleine Schichtdicken (von einigen Centimetern) untersucht werden können, und daß die beiden Bündel sehr nahe nebeneinander laufen. Für die Untersuchung der Absorption verdünnter Lösungen erwies sich die Vorrichtung als unzureichend. Deshalb hat Martens noch eine neue Vorrichtung konstruiert, welche Röhren bis zu 30 cm Länge zu verwenden gestattet. Von dem Beleuchtungsspalte s_0 (Fig. 115b) entwerfen drei Linsen 1, 2, 3 und zwei Fresnelsche Prismen q_1 und q_2 zwei reelle Bilder auf den Spalten a und b. Die Mittelstrahlen der beiden Bündel I und II sind an allen Stellen 43 mm voneinander entfernt.

Fig. 115a.

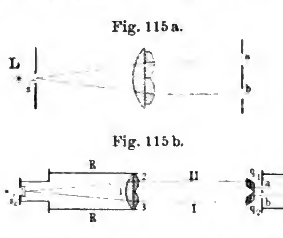


Fig. 115b.

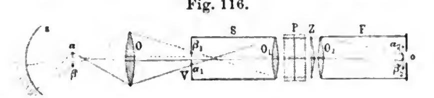
§ 120. Spektralphotometrische Anordnung von Hagen und Rubens[1]) für Reflexionsmessungen.

a) Beschreibung des Photometers. V (Fig. 116) ist ein Vierordtscher Doppelspalt; zwischen dem Prisma P und dem Objektiv O_2 ist das Zwillingsprisma Z eingeschaltet, welches bewirkt, daß von der unteren Spalthälfte α_1 die beiden Bilder α_2, von der oberen

[1]) Z. f. Instrk. 19, 293 (1899). Die Arbeit enthält auch eine ausführliche Literaturangabe über die am Schlusse des Paragraphen ausgeführten Untersuchungen.

Spalthälfte β_1 die beiden Bilder β_2 erzeugt werden. Das untere der Bilder α_2 wird mit dem oberen der Bilder β_2 am Orte der Okularblende o zur Deckung gebracht, während die beiden anderen Bilder abgeblendet werden. Das nach Maxwellscher Methode (S. 260)

Fig. 116.



unmittelbar hinter o befindliche, auf Z blickende Auge sieht die obere Hälfte von Z durch Licht von α_1, die untere Hälfte von Z durch Licht von β_1 erleuchtet. Durch Änderung der Spaltbreiten wird auf gleiche Helligkeit der beiden Hälften von Z eingestellt.

b) Messung des Reflexionsvermögens. Mittels dieses Photometers haben Hagen und Rubens eine Reihe von Metallen auf ihr Reflexionsvermögen R_λ für die Wellenlängen $\lambda = 450, 500, 550, 600, 650, 700\,\mu\mu$ bei nahezu senkrechter Inzidenz untersucht. Vor dem Hohlspiegel S aus der zu untersuchenden Substanz ist in der auf der horizontalen Hauptachse senkrechten Mittelpunktsebene etwas oberhalb der Hauptachse ein glühendes Platinblech α aufgestellt, das mit einer $2\,\mu$ dicken Platinmohrschicht überzogen ist. Durch S wird unterhalb der Hauptachse von α ein gleich großes reelles Bild β entworfen, dessen Helligkeit mit der von α mittels des Spektralphotometers verglichen wird, indem die Projektionslinse O von α und β zwei reelle Bilder α_1 und β_1 auf V erzeugt. α_1 ist also ein Bild der Vorderseite, β_1 ein Bild der Rückseite von α. Bei den Versuchen wurde nur der obere Spalt verstellt. Für jede Wellenlänge wurden vier Messungsreihen (Nr. 1 bis 4) ausgeführt. Bei Nr. 1 und 4 wurde das Platinblech ausgeschaltet und durch eine von einer lichtstarken Glühlampe gleichmäßig beleuchtete Gipsscheibe ersetzt, welche etwa 25 cm vor den Doppelspalt V schräg vorgestellt war. Bei Nr. 2 wurde das Platinblech eingeschaltet, bei Nr. 3 wurde dasselbe zur Vermeidung von Unsymmetrien um 180° gedreht. Ergibt sich nach Berücksichtigung der Nullpunktskorrektion im Mittel aus Nr. 1 und 4 die Spaltbreite b, bei Nr. 2 und 3 die Spaltbreite a_λ bzw. a_λ', so ist

$$R_\lambda = \frac{b}{0{,}5\,(a_\lambda + a_\lambda')}.$$

Beispiel. Für einen galvanisch vergoldeten Hohlspiegel aus Messing (Goldspiegel) ergab sich: $b = 33{,}6$; $a_\lambda = 91{,}3$; $a_\lambda' = 91{,}1$, demnach $R_\lambda = \frac{33{,}6}{91{,}2} = 0{,}368$ oder 36,8 Proz.

c) Messungsergebnisse. Die Ergebnisse für die verschiedenen Metalle sind in Tabelle 2, Anhang, zusammengestellt. Hieraus geht folgendes hervor.

Für reine Metalle wächst das Reflexionsvermögen R_λ im allgemeinen mit zunehmender Wellenlänge; besonders deutlich zeigt sich dies für Gold und Kupfer. Nur Eisen bzw. Stahl zeigt bei $\lambda = 550\,\mu\mu$ ein Minimum; dieselbe Erscheinung zeigen auch die eisenhaltige Legierung von Brandes und Schünemann und mit Quecksilberamalgam belegte Glasspiegel. Die in ihrer Zusammensetzung zum Teil wesentlich voneinander verschiedenen vier Spiegelmetalle von Rosse, Brashear und Schröder besitzen fast dieselben Reflexionsvermögen wie Nickel. Die Legierung von Brandes und Schünemann hat zwar nur ein relativ kleines Reflexionsvermögen, ist aber sehr politurfähig, ungemein luftbeständig und löst sich erst in Königswasser. Die Machschen Metalle besitzen ein sehr hohes, von der Wellenlänge und anscheinend auch von ihrer Zusammensetzung fast unabhängiges Reflexionsvermögen. Das Reflexionsvermögen von Silber an Glas hängt wesentlich von der Art ab, in welchem es auf letzterem niedergeschlagen wurde, und läßt sich daher nicht aus dem Reflexionsvermögen von Silber an Luft und dem Brechungsexponenten des Glases berechnen.

Die in der Tabelle mitgeteilten Zahlen stimmen im allgemeinen gut mit den von Drude[1]) aus dem Hauptazimut und Haupteinfallswinkel berechneten überein, sind aber durchgängig etwas größer als die Zahlen der anderen Beobachter.

Für die nicht sichtbaren Wellen bedienen sich Hagen und Rubens[2]) einer energetischen Methode, wobei sie eine lineare Thermosäule (S. 24) und ein Panzergalvanometer von Rubens benutzen. Schon vorher hatten Provostaye und Desains (1850) für die Gesamtstrahlung, Rubens (1889), Langley (1889), Nichols (1897), Trowbridge (1898) für das sichtbare Gebiet und einen Teil des ultraroten Spektrums das Reflexionsvermögen verschiedener Metalle ebenfalls durch Beobachtung der Wärmewirkung gemessen, während Conroy (1883) und Rayleigh (1886) eine photometrische Methode benutzten.

§ 121. Spektralphotometer von Lummer und Brodhun[3]).

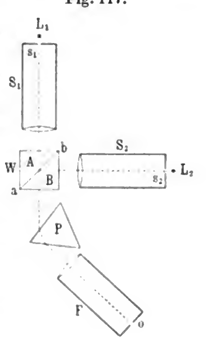
Die vom Spalt s_1 des Kollimators S_1 (Fig. 117) ausgehenden Strahlen durchlaufen den Photometerwürfel W, das Prisma P und erzeugen in der Brennebene von F das Spektrum von L_1. Die Strahlen, welche von dem Spalte s_2 des zweiten Kollimatorrohres S_2 ausgehen, dessen Achse auf der Achse von S_1 senkrecht steht, werden an der gemeinsamen Hypotenusenfläche ab der beiden Prismen A und B total reflektiert und erzeugen ein mit dem Spektrum von L_1 zusammen-

---

[1]) Wied. Ann. 39, 481 (1890).
[2]) Z. f. Instrk. 22, 42 (1902).
[3]) Ebenda 12, 132 (1892).

fallendes Spektrum von L_2. Der Beobachter, welcher nach der Methode von Maxwell (S. 260) sein Auge direkt an den Okularspalt o bringt, stellt mittels des Objektivs von F als Lupe, unter Benutzung einer Brille, scharf auf ab ein und sieht die reflektierenden Stellen $\mathfrak{r}_1$, $\mathfrak{r}_2$ (Fig. 117a) vom Lichte des Spaltes s_2, die durchlässigen Stellen $\mathfrak{b}_1$, $\mathfrak{b}_2$ vom Lichte des Spaltes s_1 erleuchtet. Die Einstellung geschieht durch Veränderung der Weite der Kollimatorspalte oder besser noch durch einen rotierenden Sektor.

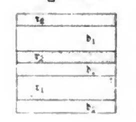
Fig. 117.



Damit die Grenzlinien der Vergleichsfelder scharf sind und im Momente der Gleichheit verschwinden, müssen sie senkrecht zur brechenden Kante des Prismas verlaufen. Demgemäß wird die Hypotenusenfläche ab in horizontale Streifen eingeteilt, die das Licht abwechselnd reflektieren und durchlassen.

Will man auch das Kontrastprinzip benutzen, so hat man vollkommen planparallele und schlierenfreie Platten anzuwenden.

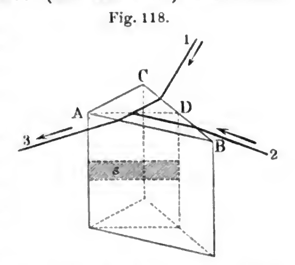
Fig. 117a.



§ 122. Das Spektralphotometer von Brace[1]).

Brace hat das Photometer von Lummer und Brodhun dadurch vereinfacht, daß er den Prismenwürfel und das Zerstreuungsprisma durch ein Flintglasprisma mit gleichseitiger Basis (Fig. 118) ersetzt. Dasselbe ist in zwei Hälften ABD und ACD (also $AD \perp BC$) zerschnitten. Nachdem ein Streifen s des Prismas ABD versilbert ist, werden die Prismen wieder aneinandergekittet. Die Strahlenbündel 1 und 2 kommen aus zwei mit Spalten versehenen Kollimatoren; nachdem 1 durch das Prisma hindurchgegangen und 2 an dem Silberstreifen s reflektiert ist, gelangen die beiden Bündel in der Richtung 3 in das Beobachtungsrohr, in dessen Brennebene zwei zusammenfallende Spektra entstehen.

Fig. 118.



Das Auge blickt durch den Okularspalt auf die Fläche AD und sieht den Streifen s durch Licht von 2, den freien Teil der Fläche durch Licht von 1 beleuchtet.

[1]) Phil. Mag. (5) 48, 420 (1899). Astrophys. J. 11, 6 (1900).

Achtes Kapitel.

Bestimmung von mittleren Lichtstärken.

A. Definitionen.

§ 123. Lampenachse.

Bei denjenigen elektrischen Glühlampen, z. B. Kohlenfadenlampen, welche sich ohne Beeinträchtigung ihrer Lichtausstrahlung nach allen Richtungen drehen lassen und deshalb in der Praxis auch in allen Stellungen verwendet werden, werde unter *Lampenachse* die Sockelachse in der Richtung vom Sockel nach dem Glühkörper verstanden (Fig. 119 a Kohlenfadenlampe). Bei den übrigen Lampen, welche in der Praxis fast ausschließlich entweder aufrecht stehend oder vertikal nach unten hängend gebraucht werden, soll unter *Lampenachse* die durch die Lampenmitte (den photometrischen Mittelpunkt der Lichtquelle, S. 75) vertikal nach unten gehende Gerade verstanden werden (Fig. 119 b, Bogenlicht). In den meisten Fällen ist die Lampenachse eine Symmetrieachse (s. S. 271).

Fig. 119 a. Fig. 119 b.

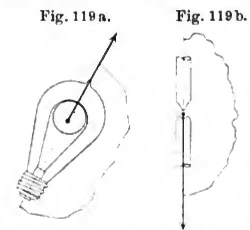
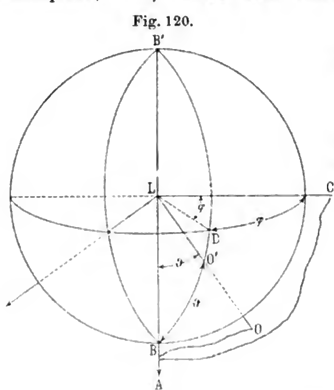


Fig. 120.



Meridianebene werde jede durch die Lampenachse gehende und von dieser begrenzte Ebene genannt.

Es bezeichne (Fig. 120):

L die Mitte der Lampe;

LA die Lampenachse;

LO eine beliebige Ausstrahlungsrichtung;

ϑ den Ausstrahlungswinkel ALO gegen die Lampenachse;

φ den Winkel, welchen die Meridianebene ALO mit einer beliebigen als Anfang der Zählung angenommenen Meridianebene ALC bildet.

Wenn wir ein Polarkoordinatensystem (Anhang 2) einführen, dessen Mittelpunkt in L, dessen Pol B in der Achse LA und dessen Anfangsmeridian in der Meridianebene ALC liegt, so ist die Richtung LO durch die *Poldistanz* ϑ und die *Länge* φ desjenigen Punktes O' gegeben, in welchem die um L mit dem Radius 1 geschlagene Kugel, die sog. Einheitskugel, von der Linie LO durchschnitten wird. Es soll nun allgemein

$$J(\vartheta, \varphi)$$

die Lichtstärke der Lampe in der Ausstrahlungsrichtung ϑ, φ bezeichnen.

Ferner werde unter dem Parallelkreis ϑ derjenige Parallelkreis der Einheitskugel, welcher unter der Poldistanz ϑ liegt, und unter der Zone $\vartheta_{i,k}$ die von den Parallelkreisen ϑ_i und ϑ_k begrenzte Zone verstanden.

§ 124. Mittlere Lichtstärken.

a) Mittlere Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse.

Hierunter werde das Mittel aus den Lichtstärken in allen zur Lampenachse senkrechten Richtungen verstanden. Die Bezeichnung sei

$$J_m.$$

J_m ist also die sogenannte *mittlere horizontale Lichtstärke*, wenn die Lampenachse vertikal steht.

Wenn keine große Genauigkeit beansprucht wird, genügt es zuweilen in zwei aufeinander senkrecht stehenden oder in drei um je 120° voneinander entfernten Richtungen senkrecht zur Lampenachse zu messen und aus den erhaltenen Lichtstärken das Mittel zu nehmen. Für *genaue* Messungen muß man in einer hinreichend großen Anzahl q gleich weit voneinander entfernter Richtungen photometrieren. Beispielsweise hat man für elektrische Kohlenfadenlampen (S. 329) $q = 40$ zu wählen, so daß die einzelnen Ausstrahlungsrichtungen je 9° voneinander entfernt sind. Für Gasglühlicht genügt $q = 10$.

Diese Messungen lassen sich am schnellsten ausführen, wenn man die Lampe um ihre eigene Achse drehbar macht und sie nach jeder Messung um den gleichen Winkel dreht.

b) Mittlere Lichtstärke unter der Poldistanz ϑ.

Hierunter werde das Mittel aus den Lichtstärken in allen Richtungen verstanden, welche die Poldistanz ϑ besitzen, also auf einem Kreiskegel liegen, dessen Spitze die Lampenmitte ist, dessen Achse mit der Lampenachse zusammenfällt und dessen halber Öffnungswinkel ϑ ist. Die Bezeichnung sei

$$J(\vartheta).$$

Demnach kann man J_m auch mit $J(\pi/2)$ oder $J(90^0)$ bezeichnen, je

nachdem man ϑ in absolutem Winkelmaß (Anhang 2) oder Bogengraden ausdrückt.

Wenn man $J(\vartheta)$ genau bestimmen will, so hat man in ebensovielen, gleich weit voneinander entfernten Meridianen wie bei der Bestimmung von J_m zu messen und aus den erhaltenen Zahlen das Mittel zu nehmen.

c) Mittlere räumliche Lichtstärke.

Hierunter werde nach dem Vorgange von Allard[1]) der Mittelwert der (für hinreichend große Entfernungen gültigen) Lichtstärken in allen Richtungen des Raumes oder, was dasselbe ist, die nach allen Richtungen konstante Lichtstärke verstanden, welche eine Lichtquelle haben müßte, damit der in den räumlichen Winkel 4π (auf die ganze Oberfläche der Einheitskugel) ausgesandte Lichtstrom Φ_s gleich dem wirklich ausgesandten ist. Die Bezeichnung für mittlere räumliche Lichtstärke sei

$$J_s.$$

Nun ist der von einer nach allen Seiten mit der Lichtstärke J_s leuchtenden (punktförmigen) Lichtquelle im ganzen ausgesandte Lichtstrom $4\pi J_s$ (S. 149); da dieser Ausdruck gleich Φ_s sein soll, so ergibt sich

$$J_s = \frac{\Phi_s}{4\pi} \quad \text{1)}$$

d. h. *die mittlere räumliche Lichtstärke J_s ist gleich dem Gesamtlichtstrome Φ_s, dividiert durch 4π.*

d) Untere und obere hemisphärische Lichtstärke.

Eine durch die Lampenmitte gelegte Horizontalebene teilt den Raum in zwei Teile, den oberen räumlichen Winkel 2π und den unteren räumlichen Winkel 2π (die obere und untere Halbkugel). Bei aufrecht stehenden oder vertikal nach unten hängenden Lampen wird unter der *(mittleren) unteren bzw. oberen hemisphärischen Lichtstärke*

$$J_{s,u} \quad \text{bzw.} \quad J_{s,o}$$

der Mittelwert der Lichtstärken in allen Richtungen unterhalb bzw. oberhalb der durch die Lampenmitte gehenden Horizontalebene verstanden. Bezeichnet

Φ_u bzw. Φ_o den in den unteren bzw. oberen räumlichen Winkel 2π entsandten Lichtstrom,

so ist entsprechend Gleichung 1):

$$J_{s,u} = \frac{\Phi_u}{2\pi}; \quad J_{s,o} = \frac{\Phi_o}{2\pi} \quad \text{2)}$$

[1]) Mémoire sur l'intensité et la portée des phares. Paris 1876.

so daß

$$J_s = \frac{J_{s,u} + J_{s,o}}{2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

Für gewöhnlich findet man $J_{s,u}$ zur Kennzeichnung einer Lampe angegeben. Es wird dies damit begründet, daß für die Zwecke der Praxis nur das auf die untere Halbkugel ausgestrahlte Licht in Betracht kommt. Eine solche *einseitige* Bestimmung ist aber *nicht einwandfrei.* Vom photometrischen Standpunkte aus muß man das *ganze*, nach allen Richtungen hin ausgestrahlte Licht in Rechnung ziehen, um so mehr, als man Mittel besitzt, das nach oben ausgestrahlte Licht ohne verhältnismäßig großen Verlust durch Reflexion nach unten zu werfen.

e) Räumliche Lichtverteilung.

Denkt man sich von der Lampenmitte L aus nach allen Richtungen hin die für diese Richtungen geltenden Lichtstärken der Größe nach durch Strecken in irgend einem Maße (z. B. 1 HK = 1, 2, 10, allgemein b mm) aufgetragen, so liegen die Endpunkte dieser Linien auf der *„photometrischen Oberfläche“*.

Die durch die Lampenmitte L senkrecht zur Lampenachse gelegte Ebene schneidet die Oberfläche in einer Kurve, welche die Verteilung der Lichtstärke in dieser Ebene kennzeichnet. Ebenso gibt die von einer beliebigen Meridianebene aus der Oberfläche herausgeschnittene Kurve die Lichtverteilung in dieser Ebene an. Sind alle Meridianalkurven gleich, so ist die Lampenachse eine *Symmetrieachse.*

Fig. 121.

Denkt man sich von L (Fig. 121 a, Wechselstrombogenlampe, und Fig. 121 b, aufrechtstehende Kohlenfadenlampe) Leitstrahlen gezogen, welche mit der Lampenachse LA die $(p + 1)$ Winkel ϑ_0 (= 0), ϑ_1, ϑ_2 ... ϑ_p (= 180°) bilden, und macht diese Lichtstrahlen gleich den mittleren Lichtstärken $J(\vartheta_0)$, $J(\vartheta_1)$, $J(\vartheta_2) \ldots J(\vartheta_p)$, so erhält man durch Verbindung der Endpunkte B_0, B_1, $B_2 \ldots$ dieser Strecken die *Kurve der räumlichen Lichtverteilung.*

B. Berechnung der mittleren räumlichen Lichtstärke und der hemisphärischen Lichtstärken.

§ 125. Methode 1 (Rechnerisches Verfahren).

Es werde hier sowie in den beiden folgenden Paragraphen der Einheitlichkeit wegen angenommen, daß auch die elektrischen Glühlampen, welche in der Praxis in allen Richtungen verwendet werden, vertikal nach unten hängen, so daß in allen Fällen die Lampenachse vertikal nach unten geht. Für diese Richtung ist also $\vartheta = 0$, während für die von der Lampenmitte nach oben gehende Vertikale $\vartheta = 180^0$ und für die horizontalen Richtungen $\vartheta = 90^0$ ist.

a) Annäherungsformel.

Man bestimmt die mittleren Lichtstärken $J(\vartheta_1)$, $J(\vartheta_2) \ldots J(\vartheta_{p-1})$ unter den $(p - 1)$ in Bogengraden ausgedrückten Poldistanzen ϑ_1, $\vartheta_2 \ldots \vartheta_{p-1}$ (z. B. $\vartheta_1 = 10{,}2^0$, $\vartheta_2 = 19{,}1^0$, $\vartheta_3 = 31{,}4^0 \ldots \vartheta_{p-1} = 170{,}6^0$) und erhält

$$J_s = \left\{\frac{J(\vartheta_1) \sin \vartheta_1}{2} \vartheta_1 + \frac{J(\vartheta_1) \sin \vartheta_1 + J(\vartheta_2) \sin \vartheta_2}{2} (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \cdots + \frac{J(\vartheta_{p-1}) \sin \vartheta_{p-1}}{2} (180 - \vartheta_{p-1})\right\} \frac{\pi}{360} \quad \ldots \quad 1)$$

wofür sich, da $\sin \vartheta_0 = \sin \vartheta_p = 0$ ist, auch kurz schreiben läßt

$$J_s = \frac{\pi}{360} \sum_{k=0}^{k=p-1} \frac{J(\vartheta_k) \sin \vartheta_k + J(\vartheta_{k+1}) \sin \vartheta_{k+1}}{2} (\vartheta_{k+1} - \vartheta_k) \quad 2)$$

Hierin hat man unter dem Summenzeichen Σ für k nacheinander $0, 1, 2 \ldots (p - 1)$ zu setzen und die so entstehenden Ausdrücke sodann zu addieren.

Beweis: Wir haben zunächst den Lichtstrom Φ_s zu berechnen, welcher von L in den Raumwinkel 4π, oder was auf dasselbe hinausläuft, auf die Oberfläche der um L beschriebenen Einheitskugel ausgestrahlt wird. Zu diesem Zwecke denken wir uns die Kugel durch Parallelkreise ϑ_1, $\vartheta_2 \ldots \vartheta_{p-1}$ in p Teile zerlegt. Der erste Teil, die am Pol anliegende Kugelkappe, wird also von dem Parallelkreise ϑ_1, oder falls wir die Kappe als Zone auffassen, von den Parallelkreisen ϑ_0 $(= 0^0)$ und ϑ_1 begrenzt; der zweite Teil ist die Zone $\vartheta_{1,2}$, der zweitletzte die Zone $\vartheta_{p-2,\,p-1}$; der letzte, die am Gegenpol anliegende Kappe, wird, falls wir sie wieder als Zone auffassen, von den Parallelkreisen ϑ_{p-1} und ϑ_p $(= 180^0)$ begrenzt. Von diesen p Zonen greifen wir die beliebige Zone $\vartheta_{k,\,k+1}$ heraus, wo k eine zwischen 0 und $(p - 1)$ liegende beliebige ganze Zahl ist. Der auf diese Zone auffallende Lichtstrom werde bezeichnet mit

$$\Phi_{k,\,k+1}.$$

Zur Berechnung dieses Lichtstromes teilen wir die Zone $\vartheta_{k,\,k+1}$ durch q gleich weit voneinander entfernte Meridiane in q gleiche Teile. Die Parallelkreise ϑ_k und ϑ_{k+1} haben die Umfänge $2\pi \sin \vartheta_k$ und $2\pi \sin \vartheta_{k+1}$. Falls

die Zonenbreite $(\vartheta_{k+1} - \vartheta_k)$ als hinlänglich klein und die Zahl q als hinlänglich groß angenommen wird, ist jeder der q Zonenteile nahezu ein Rechteck, dessen Seiten $\frac{2\pi}{q} \sin \vartheta_k$ und $\frac{\pi}{180}(\vartheta_{k+1} - \vartheta_k)$ sind, dessen Inhalt also ist

$$\frac{\pi^2}{90\,q} \sin \vartheta_k (\vartheta_{k+1} - \vartheta_k).$$

Fig. 122.

Von den q Teilen betrachten wir zunächst denjenigen Teil ω (Fig 122), dessen einer Eckpunkt die Koordinaten ϑ_k, φ hat, und zwar wollen wir annehmen, daß die Lichtstärke in allen Richtungen, welche von dem Zonenteile ω begrenzt werden (oder kürzer ausgedrückt: die Lichtstärke innerhalb ω) konstant und gleich $J(\vartheta_k, \varphi)$ ist. Alsdann ist der auf ω auffallende Lichtstrom nahezu (Zeichen für nahezu $\sim$)

$$\frac{\pi^2}{90\,q} J(\vartheta_k, \varphi) \sin \vartheta_k (\vartheta_{k+1} - \vartheta_k),$$

so daß

$$\Phi_{k,k+1} \sim \frac{\pi^2}{90} \sin \vartheta_k (\vartheta_{k+1} - \vartheta_k) \sum \frac{J(\vartheta_k, \varphi)}{q} \quad \ldots\ldots \quad 3)$$

wobei sich das Summenzeichen über alle q Teile zu erstrecken hat.

Nun ist der Definition gemäß

$$\sum \frac{J(\vartheta_k, \varphi)}{q} = J(\vartheta_k),$$

mithin geht Ausdruck 3) über in

$$\Phi_{k,k+1} \sim \frac{\pi^2}{90} J(\vartheta_k) \sin \vartheta_k (\vartheta_{k+1} - \vartheta_k) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Andererseits ist der Flächeninhalt jedes der q Zonenteile auch nahezu

$$\frac{\pi^2}{90\,q} \sin \vartheta_{k+1} (\vartheta_{k+1} - \vartheta_k),$$

und wenn wir die Lichtstärke innerhalb ω gleich $J(\vartheta_{k+1}, \varphi)$ setzen, ist

$$\Phi_{k,k+1} \sim \frac{\pi^2}{90} J(\vartheta_{k+1}) \sin \vartheta_{k+1} (\vartheta_{k+1} - \vartheta_k) \quad \ldots\ldots \quad 5)$$

Mit noch größerer Annäherung erhalten wir als Mittelwert aus 4) und 5)

$$\Phi_{k,k+1} = \frac{\pi^2}{90} \frac{J(\vartheta_k) \sin \vartheta_k + J(\vartheta_{k+1}) \sin \vartheta_{k+1}}{2} (\vartheta_{k+1} - \vartheta_k) \quad \ldots \quad 6)$$

Bilden wir für jede Zone diesen Ausdruck und addieren alle diese Größen, so erhalten wir den Gesamtlichtstrom Φ_s und hieraus nach Division mit 4π gemäß Gleichung 1), S. 270, den Ausdruck 1.

b) Streng gültige Formel.

Denkt man sich ϑ und φ in absolutem Maße ausgedrückt und geht zu unendlich kleinen Größen über, so ist der Flächeninhalt des Elementes ω in aller Strenge $\sin \vartheta \, d\vartheta \, d\varphi$ [Gl. 6), Anhang 2], demnach der auf ω auffallende Lichtstrom $J(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta \, d\vartheta \, d\varphi$, so daß man Φ_s erhält, wenn man nach φ

von 0 bis 2π und nach ϑ von 0 bis π integriert. Dividieren wir diesen Ausdruck durch 4π, so wird

$$J_s = \frac{1}{4\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} J(\vartheta, \varphi) \sin\vartheta \, d\vartheta \, d\varphi.$$

Führen wir die Integration nach φ aus und berücksichtigen, daß der Definition gemäß

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} J(\vartheta, \varphi)\, d\varphi = J(\vartheta)$$

ist, so wird

$$J_s = \frac{1}{2}\int_0^{\pi} J(\vartheta) \sin\vartheta \, d\vartheta \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1\text{a})$$

Ebenso wird

$$J_{s,u} = \int_0^{\pi/2} J(\vartheta) \sin\vartheta \, d\vartheta; \;\; J_{s,o} = \int_{\pi/2}^{\pi} J(\vartheta) \sin\vartheta \, d\vartheta \, . \quad . \quad 1\text{b})\; 1\text{c})$$

c) Umformung von Gleichung 1).

Die Rechnung gestaltet sich einfacher, wenn man von ϑ_1 ausgehend bis zu $\vartheta_{p-1} = 180 - \vartheta_1$ in gleich weit voneinander entfernten Poldistanzen mißt, und zwar empfiehlt es sich in einer ungeraden Anzahl $(2n - 1)$ Poldistanzen[1]) zu messen, weil dann unter diesen auch die Poldistanz 90° (horizontale Richtung) enthalten ist. Bezeichnet man den Winkel, welchen zwei aufeinander folgende Poldistanzen miteinander bilden, mit α, so wird

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 - \vartheta_1 = \vartheta_3 - \vartheta_2 = \cdots = \vartheta_{2n} - \vartheta_{2n-1} = \alpha = \frac{180}{2n} = \frac{90}{n}$$

$$\vartheta_1 = \alpha;\; \vartheta_2 = 2\alpha;\; \ldots\; \vartheta_{2n-1} = (2n-1)\alpha;\; \vartheta_{2n} = 180.$$

Mithin geht Gleichung 1) über in

$$J_s = \frac{\pi}{4n}\Big\{J(\alpha)\sin\alpha + J(2\alpha)\sin 2\alpha + \cdots + J\big((2n-1)\alpha\big)\sin(2n-1)\alpha\Big\} \quad . \; . \; . \quad 7)$$

oder in abgekürzter Bezeichnung

$$J_s = \frac{\pi}{4n}\sum_{k=1}^{k=2n-1} J(k\alpha)\sin k\alpha \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

Nun ist

$$(2n-1)\alpha = 180 - \alpha;\quad (2n-2)\alpha = 180 - 2\alpha, \ldots$$
$$\sin(2n-1)\alpha = \sin\alpha;\quad \sin(2n-2)\alpha = \sin 2\alpha, \ldots$$

Demnach kann man in Gleichung 7) unter der Klammer die vom Ende gleich weit voneinander entfernten Glieder zusammenfassen, wodurch sich die Rechnung noch weiter verkürzt; man erhält:

---

[1]) Hat man unter beliebigen Poldistanzen ϑ beobachtet, so kann man aus der Kurve der räumlichen Lichtverteilung die Größen $J(\vartheta)$ für diese $(2n - 1)$ Poldistanzen bestimmen und auf diese durch graphische Interpolation gefundenen Werte die jetzt zu entwickelnden Formeln anwenden.

$$J_s = \frac{\pi}{4n}\{[J(\alpha) + J(180-\alpha)]\sin\alpha + [J(2\alpha) + J(180-2\alpha)]\sin 2\alpha + \cdots + J(90)\} \qquad 9)$$

Ebenso ist analog Gl. 1 b) und 1 c)

$$J_{s,u} = \frac{\pi}{2n}\{J(\alpha)\sin\alpha + J(2\alpha)\sin 2\alpha + \cdots + J(90-\alpha)\sin(90-\alpha) + \tfrac{1}{2}J(90)\} \qquad 9a)$$

$$J_{s,o} = \frac{\pi}{2n}\{\tfrac{1}{2}J(90) + J(90+\alpha)\sin(90-\alpha) + \cdots + J(180-\alpha)\sin\alpha\} \qquad 9b)$$

Ist beispielsweise $n = 6$, so wird $\alpha = 15^0$ und

$$\begin{aligned} J_s &= \frac{\pi}{24}\{J(15)\sin 15 + J(30)\sin 30 + \cdots + J(75)\sin 75 + J(90) + J(105)\sin 75 + \cdots + J(165)\sin 15^0\} \\ &= \frac{\pi}{24}\{[J(15) + J(165)]\sin 15 + \cdots + [J(75) + J(105)]\sin 75 + J(90)\} \\ J_{s,u} &= \frac{\pi}{12}\{J(15)\sin 15 + \cdots + J(75)\sin 75 + \tfrac{1}{2}J(90)\} \\ J_{s,o} &= \frac{\pi}{12}\{\tfrac{1}{2}J(90) + J(105)\sin 75 + \cdots + J(165)\sin 15^0\} \end{aligned} \qquad 10)$$

d) Zahlenbeispiel.

Es sei bei einer Gleichstrombogenlampe, von $\vartheta = 0$ ausgehend bis $\vartheta = 180^0$, in 13 Poldistanzen gemessen und gefunden unter

$\vartheta =$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180⁰
$J(\vartheta) =$	105	208	401	696	741	545	402	336	246	80	3	0	0 HK

Von diesen 13 Poldistanzen kommen hier 0 und 180⁰ nicht in Betracht, so daß im ganzen 11 übrig bleiben, welche von 15⁰ in Abständen $\alpha = 15^0$ bis 165⁰ gehen; es ist hier also $2n - 1 = 11$; mithin $n = 6$. Nun ist für

$\vartheta =$	15	30	45	60	75	90⁰
$J(\vartheta) + J(180-\vartheta) =$	208	404	776	987	881	402 HK
$\sin\vartheta =$	0,259	0,500	0,707	0,866	0,966	1,000;

demnach erhält man nach Gl. 10) (etwa mit 4stellig. Logarithmen):

$$J_s = \frac{\pi}{24}(208\cdot 0{,}259 + 404\cdot 0{,}500 + 776\cdot 0{,}707 + 987\cdot 0{,}866 + 881\cdot 0{,}966 + 402) = 381{,}1 \text{ (rund 381) HK.}$$

Ebenso ergibt sich

$$J_{s,u} = 554 \text{ HK}; \quad J_{s,o} = 209 \text{ HK}.$$

Je größer n ist, um so genauer werden natürlich die Werte für J_s, $J_{s,u}$ und $J_{s,o}$. In den meisten Fällen genügt schon $n = 5$, also $\alpha = 18^0$. Haben wir z. B. eine nach allen Seiten mit der gleichen Lichtstärke J leuchtende Lichtquelle, ist also $J_s = J_{s,u} = J_{s,o} = J$, so ergibt sich nach Gleichungen 9), 9a) und 9b) für $\alpha = 18^0$:

$$J_s = J_{s,u} = J_{s,o} = \frac{\pi}{20} J(2 \sin 18 + 2 \sin 36 + 2 \sin 54 + 2 \sin 72 + 1) = 0{,}992\, J,$$

also ein um nur 0,8 Proz. zu kleiner Wert.

Entsprechend erhalten wir für

$\alpha =$	30^0	15^0	10^0	9^0
$J_s = J_{s,u} = J_{s,o} =$	0,977	0,994	0,997	0,998

Die eben besprochene Methode hat den Übelstand, daß die Lichtstärke in Richtung der Lampenachse [also $J(0)$], welche bei Lampen mit Reflektoren oft relativ groß ist, nicht berücksichtigt wird. Bei den folgenden Methoden wird auch diese Größe sowie $J(180^0)$ in Rechnung gezogen.

§ 126. Methode 2 (Rechnerisches Verfahren).

a) Annäherungsformel.

Man bestimmt in den $(p + 1)$ Poldistanzen ϑ_0 $(= 0^0)$, $\vartheta_1 \ldots \vartheta_p$ $(= 180^0)$ die entsprechenden mittleren Lichtstärken. Alsdann ist [1])

$$J_s = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^{k=p-1} \{J(\vartheta_k) + J(\vartheta_{k+1})\}(\cos \vartheta_k - \cos \vartheta_{k+1}) \qquad 1)$$

Beweis. Der Flächeninhalt der Kugelzone $\vartheta_{k,k+1}$ ist in aller Strenge $2\pi(\cos \vartheta_k - \cos \vartheta_{k+1})$; mithin hat der vorher erwähnte Zonenteil ω in aller Strenge den Flächeninhalt

$$\frac{2\pi}{q}(\cos \vartheta_k - \cos \vartheta_{k+1}).$$

Nehmen wir die Lichtstärke innerhalb ω gleich

$$\frac{J(\vartheta_{k,\varphi}) + J(\vartheta_{k+1,\varphi})}{2},$$

an, so ist, wenn wir über die q Zonenteile summieren,

$$\Phi_{k,k+1} = 2\pi \left\{\frac{J(\vartheta_k) + J(\vartheta_{k+1})}{2}\right\}(\cos \vartheta_k - \cos \vartheta_{k+1}).$$

Durch Summation über alle Zonen ergibt sich Φ_s und hieraus nach Division mit 4π Gleichung 1).

---

[1]) Voit, Wiener Ausstellungsbericht, S. 140.

b) Umformung von Gleichung 1).

Gleichung 1) läßt sich schreiben in der Form

$$\left.\begin{aligned} J_s = \frac{1}{4}\Big[J(0)(1-\cos\vartheta_1) + J(\vartheta_1)(1-\cos\vartheta_2) \\ + J(\vartheta_2)(\cos\vartheta_1 - \cos\vartheta_3) + \cdots + J(\vartheta_{p-2})(\cos\vartheta_{p-3} - \cos\vartheta_{p-1}) \\ + J(\vartheta_{p-1})(\cos\vartheta_{p-2} + 1) + J(180)(\cos\vartheta_{p-1} + 1)\Big] \end{aligned}\right\} \quad 2)$$

Ist in der ungeraden Anzahl $(2n + 1)$ gleich weit entfernter Poldistanzen gemessen, so wird

$$\left.\begin{aligned} J_s = \frac{J(0) + J(180)}{2}\,\frac{1-\cos\vartheta_1}{2} + \frac{J(\vartheta_1) + J(180-\vartheta_1)}{2}\,\frac{1-\cos\vartheta_2}{2} \\ + \frac{J(\vartheta_2) + J(180-\vartheta_2)}{2}\,\frac{\cos\vartheta_1 - \cos\vartheta_3}{2} + \cdots\cdots\cdots \\ + \frac{J(\vartheta_{n-1}) + J(180-\vartheta_{n-1})}{2}\,\frac{\cos\vartheta_{n-2} - \cos\vartheta_n}{2} \\ + J(90)\,\frac{\cos\vartheta_{n-1} - \cos\vartheta_{n+1}}{4} \end{aligned}\right\} \quad 3)$$

Hierin ist zu setzen:

$$\vartheta_1 = \alpha = 90/n;\quad \vartheta_2 = 2\alpha\ \ldots;\quad \vartheta_{n-1} = (n-1)\alpha = 90 - \alpha;$$

$$\vartheta_n = 90;\quad \vartheta_{n+1} = 90 + \alpha;$$

demnach
$$\frac{\cos\vartheta_{n-1} - \cos\vartheta_{n+1}}{4} = \frac{\cos(90-\alpha)}{2}.$$

Wir bezeichnen nun in Gleichung 3) zur Abkürzung den Koeffizienten von $\frac{J(\vartheta) + J(180-\vartheta)}{2}$ mit $K(\vartheta)$ und dem entsprechend den Koeffizienten von $J(90)$ mit $K(90)$, so daß Gleichung 3) übergeht in

$$\left.\begin{aligned} J_s = \frac{J(0) + J(180)}{2}\,K(0) + \frac{J(\alpha) + J(180-\alpha)}{2}\,K(\alpha) + \cdots \\ + J(90)\,K(90) \end{aligned}\right\} \quad 4)$$

Alsdann ist

$$J_{s,u} = J(0)\,K(0) + J(\alpha)\,K(\alpha) + \cdots + J(90)\,K(90) \quad . \; . \; . \quad 4\,a)$$

$$J_{s,o} = J(180)\,K(0) + J(180-\alpha)\,K(\alpha) + \cdots + J(90)\,K(90) \quad 4\,b)$$

Setzt man speziell $n = 3 \quad 5 \quad 6 \quad 9$,
also die Zonenbreite $\alpha = 30 \quad 18 \quad 15 \quad 10^0$,

so findet man für $2\,K(\vartheta)$ die folgenden Tabellen A, B, C und D:

A $n=3$ $\alpha=30^0$		*B* $n=5$ $\alpha=18^0$		*C* $n=6$ $\alpha=15^0$		*D* $n=9$ $\alpha=10^0$	
ϑ	$2K(\vartheta)$	ϑ	$2K(\vartheta)$	ϑ	$2K(\vartheta)$	ϑ	$2K(\vartheta)$
0°	1 — *cos* 30	0°	1 — *cos* 18	0°	1 — *cos* 15	0°	1 — *cos* 10
30	1 — *cos* 60	18	1 — *cos* 36	15	1 — *cos* 30	10	1 — *cos* 20
60	*cos* 30	36	*cos* 18 — *cos* 54	30	*cos* 15 — *cos* 45	20	*cos* 10 — *cos* 30
90	*cos* 60	54	*cos* 36 — *cos* 72	45	*cos* 30 — *cos* 60	30	*cos* 20 — *cos* 40
		72	*cos* 54	60	*cos* 45 — *cos* 75	40	*cos* 30 — *cos* 50
		90	*cos* 72	75	*cos* 60	50	*cos* 40 — *cos* 60
				90	*cos* 75	60	*cos* 50 — *cos* 70
						70	*cos* 60 — *cos* 80
						80	*cos* 70
						90	*cos* 80

Hieraus berechnen sich für $K(\vartheta)$ die folgenden Tabellen A' bis D':

A' $n=3$ $\alpha=30^0$		*B'* $n=5$ $\alpha=18^0$		*C'* $n=6$ $\alpha=15^0$		*D'* $n=9$ $\alpha=10^0$	
ϑ	$K(\vartheta)$	ϑ	$K(\vartheta)$	ϑ	$K(\vartheta)$	ϑ	$K(\vartheta)$
0°	0,067	0°	0,024	0°	0,017	0°	0,008
30	0,250	18	0,096	15	0,067	10	0,030
60	0,433	36	0,182	30	0,129	20	0,059
90	0,250	54	0,250	45	0,183	30	0,087
		72	0,294	60	0,224	40	0,112
		90	0,154	75	0,250	50	0,133
				90	0,129	60	0,150
						70	0,163
						80	0,171
						90	0,087

c) Beispiele.

1. Es sei $\alpha = 30^0$. Dann wird

$$J_s = 0{,}067\left[\frac{J(0)+J(180)}{2}\right] + 0{,}250\left[\frac{J(30)+J(150)}{2}\right] + 0{,}433\left[\frac{J(60)+J(120)}{2}\right] + 0{,}250\,J(90).$$

2. Das Zahlenbeispiel von Methode 1 gibt für:

$\vartheta =$	0	15	30	45	60	75	90°
$\dfrac{J(\vartheta)+J(180-\vartheta)}{2} =$	52,5	104	202	388	494	440	402
$K(\vartheta) =$	0,017	0,067	0,129	0,183	0,224	0,250	0,129

also

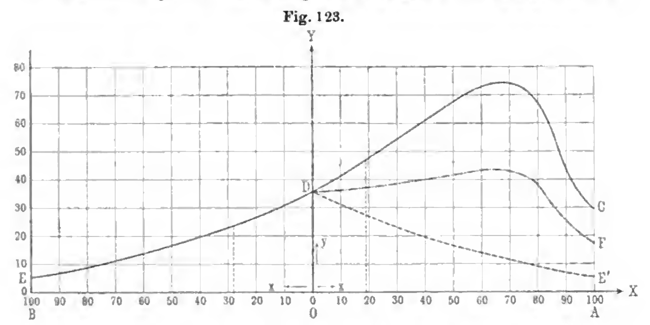
$$J_s = 52{,}5 \times 0{,}017 + 104 \times 0{,}067 + 202 \times 0{,}129 + \cdots = 377 \text{ HK}.$$

§ 127. Methode 3 (Graphisches Verfahren).

a) Verfahren von Liebenthal[1]).

1. Prinzip des Verfahrens. Man benutzt ein rechtwinkeliges Koordinatensystem (am besten Millimeterpapier). O sei der Anfang des Systems, OX die positive Abszissenachse, OY die positive Ordinatenachse (Fig. 123). Man trägt als Abszissen x die Strecken $a \cos \vartheta$

Fig. 123.



(wobei $a = 100$ mm gewählt werde) und als Ordinaten die entsprechenden Größen $J(\vartheta)$ auf (wobei 1 HK $= b$ mm, z. B. $^1/_{10}$ mm gewählt werden möge). Die so erhaltenen Punkte verbindet man durch die Kurve CDE, welche die OY-Achse im Punkte D schneidet[2]). Bezeichnet man den in Quadratmillimeter ausgedrückten Inhalt der Flächen

	$ODCA$	$ODEB$	$ACDEB$
mit	F_o	F_u	F,

so ist in HK ausgedrückt:

$$J_{s,o} = \frac{F_o}{a \cdot b}; \quad J_{s,u} = \frac{F_u}{a \cdot b}; \quad J_s = \frac{F}{2a \cdot b} = \frac{J_{s,u} + J_{s,o}}{2} \qquad 1)$$

Beweis. Führt man in Gleichung 1a), 1b) und 1c), S. 274 statt der Variablen ϑ die Variable $a \cos \vartheta$ ein, so wird, da $d(a \cos \vartheta) = -a \sin \vartheta \, d\vartheta$ ist,

$$J_s = \frac{1}{2a} \int_{-a}^{a} J(\vartheta) \, d(a \cos \vartheta) = \frac{1}{a} \int_0^a \frac{J(\vartheta) + J(180 - \vartheta)}{2} \, d(a \cos \vartheta),$$

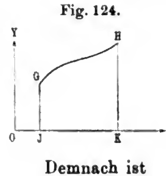
---

[1]) E. T. Z. **10**, 337 (1889).

[2]) Die Punkte C, D, E haben also die Abszissen $OA = 100$ mm, bzw. O und OB ($= -100$ mm). Diese Punkte entsprechen den Werten $\vartheta = 0$ bzw. 90 und 180°; es ist also $AC = \frac{1}{b} J(0)$, $OD = \frac{1}{b} J(90)$, $BE = \frac{1}{b} J(180)$.

$$J_{s,u} = \frac{1}{a}\int_0^a J(\vartheta)\, d\,(a \cos \vartheta), \quad J_{s,o} = \frac{1}{a}\int_{-a}^0 J(\vartheta)\, d\,(a \cos \vartheta).$$

Fig. 124.



Es seien nun GH (Fig. 124) eine beliebige Kurve, $OJ (= p)$ und $OK (= q)$ die Abszissen ihrer Endpunkte. Alsdann versteht man unter der mittleren Ordinate $y^{(m)}$ von GH die Höhe eines Rechteckes, dessen Grundlinie JK ist und das inhaltsgleich mit der Fläche $JGHK$ $(= f)$ ist, also $y^{(m)} = f/(q-p)$.

Demnach ist

$$F_o/a \qquad F_u/a \qquad F/2a$$

die mittlere Ordinate der Kurve

$$DC \qquad DE \qquad EC.$$

Mithin können wir wegen Gleichung 1) anschaulicher auch sagen:

$J_{s,o}$ bzw. $J_{s,u}$ und J_s ist gleich der Lichtstärke, welche dargestellt wird durch die mittlere Ordinate der Kurve DC bzw. DE und EC.

Die eben besprochene Konstruktion beansprucht verhältnismäßig viel Platz. Deshalb empfiehlt es sich für die Bestimmung von $J_{s,o}$, die sich für ϑ von 90 bis 180° ergebenden negativen Werte von x ebenfalls auf die Seite der positiven x aufzutragen, wodurch man die zu DE symmetrische, gestrichelt gezeichnete Kurve DE' erhält.

Bedarf man nur J_s, so kann man sich wie in den §§ 125 und 126 die Berechnung vereinfachen, wenn man zu der Abszisse den Mittelwert $\dfrac{J(\vartheta) + J(180-\vartheta)}{2}$ als Ordinate aufträgt; man erhält so die Kurve DF, welche in der Mitte zwischen den Kurven DC und DE' liegt, und es ist

$$J_s = F_s/ab \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

wenn F_s der Inhalt der Fläche $ODFA$ ist; mit anderen Worten: Es ist J_s die durch die mittlere Ordinate der Kurve DF dargestellte Lichtstärke. Im folgenden wollen wir die Kurven DC, DE' und DF zugrunde legen.

Der Flächeninhalt F_s läßt sich mittels Planimeters oder mit einer für die Praxis hinreichenden Genauigkeit folgendermaßen bestimmen. Man teilt OA durch die (in der Figur nicht angegebenen) Punkte G_1, G_2, ... G_{n-1} in die hinreichend große Anzahl n (z. B. 20) gleicher Teile und zieht zu den Abszissen OG_1, OG_2 ... OG_{n-1} der Kurve DF die Ordinaten y_1, y_2 ... y_{n-1}, so daß F_s in n Flächen, welche nahezu Paralleltrapeze von der gleichen Höhe $\frac{a}{n}$ sind, geteilt wird. Alsdann ist, wenn gesetzt wird $OD = y_0$, $AF = y_n$,

$$F_s = \frac{y_0 + y_1}{2} \cdot \frac{a}{n} + \frac{y_1 + y_2}{2} \cdot \frac{a}{n} + \cdots + \frac{y_{n-2} + y_{n-1}}{2} \cdot \frac{a}{n} + \frac{y_{n-1} + y_n}{2} \cdot \frac{a}{n},$$

so daß, nach entsprechender Zusammenziehung, wegen Gleichung 2)

$$J_s = \frac{1}{b} \cdot \frac{y_0 + y_1 + y_2 + \cdots y_n - \frac{1}{2}(y_0 + y_n)}{n} \quad . \quad . \quad 3)$$

Analog findet man $J_{s,u}$ und $J_{s,o}$ mittels der Kurven DC und DE'.

2. Graphische Ausführung des Zahlenbeispiels von Methode 1, S. 275.

α) Bestimmung von J_s. Es ist für

$\vartheta =$	0	15	30	45	60	75	90
$\frac{J(\vartheta) + J(180 - \vartheta)}{2} =$	52,5	104	202	388	494	440	402 HK
$\cos\vartheta =$	1,000	0,966	0,866	0,707	0,500	0,259	0,000

Wir nehmen wieder $a = 100$ mm, ferner $b = 0{,}1$, so daß z. B. 388 HK dargestellt wird durch die Ordinate 38,8 mm. Dementsprechend tragen wir auf Millimeterpapier (Fig. 125), vom Punkte 0 ausgehend, als Abszissen die Größen

$x =$ 0   25,9 . . . . . . 100,0 mm

ab und als Ordinaten

$y =$ 40,2   44,0 . . . . 5,2 mm

Die so erhaltenen Punkte, welche in der Fig. 125 mit ○ bezeichnet sind, liegen auf der Kurve DF. Wenn wir von O aus in Abständen von 5 mm auf der Abszissenachse bis $x = 100$ mm fortschreiten, so sind die zugehörigen Ordinaten

$y_0 = 40{,}2$ mm	$y_7 = 46{,}0$ mm	$y_{14} = 39{,}5$ mm
$y_1 = 40{,}5$ „	$y_8 = 47{,}2$ „	$y_{15} = 33{,}4$ „
$y_2 = 41{,}2$ „	$y_9 = 48{,}4$ „	$y_{16} = 27{,}5$ „
$y_3 = 41{,}8$ „	$y_{10} = 49{,}3$ „	$y_{17} = 22{,}2$ „
$y_4 = 42{,}7$ „	$y_{11} = 48{,}8$ „	$y_{18} = 16{,}7$ „
$y_5 = 43{,}7$ „	$y_{12} = 47{,}4$ „	$y_{19} = 12{,}2$ „
$y_6 = 44{,}8$ „	$y_{13} = 44{,}3$ „	$y_{20} = 5{,}2$ „

Es ist demnach

$y_0 + y_1 + \cdots + y_{20} = 783{,}0$ mm
$y_0 + y_{20} = 22{,}7$ „
Differenz $d = 760{,}3$ mm
$\frac{1}{20} d = 38{,}02$ „

so daß nach Gleichung 3)

$$J_s = 380{,}2 \text{ (rund 380) HK.}$$

Bei diesem Verfahren, J_s unmittelbar, d. h. ohne Planimeter, als die mittlere Ordinate der Kurve DF zu bestimmen, empfiehlt es sich, die Ordinaten gleich in HK aufzutragen, wie es an der rechten Seite von Fig. 125 geschieht. Man erhält dann sofort

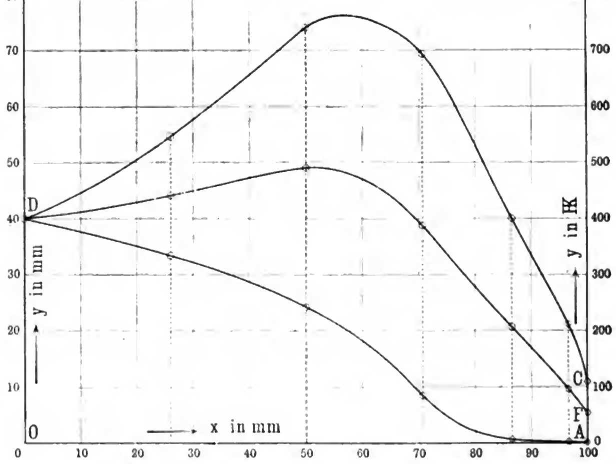
$$y_0 = 402 \text{ HK}, \quad y_1 = 405 \text{ HK} \ldots \text{ und } {}^1/_{20}\, d = 380{,}2 \text{ HK}.$$

Wenn man die Fläche $ODFA$ mittels eines Planimeters bestimmt, erhält man $F_s = 3802$ qmm, und da $a = 100$, $b = {}^1/_{10}$ ist, nach Gleichung 2) $J_s = 380$ HK.

β) **Bestimmung von $J_{s,u}$.** Es ist für

$\vartheta =$	0	15	30	45	60	75	90
$J(\vartheta) =$	105	208	401	696	741	545	402
$\cos\vartheta =$	1,00	0,966	0,866	0,707	0,500	0,259	0

Fig. 125.



Trägt man $J(\vartheta)$ (und zwar gleich in HK unter Benutzung der Teilung rechts) als Funktion von $a\cos\vartheta$ auf und verbindet die erhaltenen Punkte ○ durch die Kurve DC (Fig. 125), so findet man für $y_0, y_1 \ldots y_{20}$ der Reihe nach

402 422 448 476 507 540 577 615 655 699 741
764 764 743 704 632 534 432 335 242 105 HK.

Demnach wird

$$J_{s,u} = \frac{1}{20}\left\{y_0 + y_1 + \cdots + y_{20} - \frac{y_0 + y_{20}}{2}\right\} = 554 \text{ HK}.$$

γ) **Bestimmung von $J_{s,o}$.** Es ist für

$\vartheta =$	90	105	120	135	150	165	180
$J(\vartheta) =$	402	336	246	80	3	0	0 HK
absolut $\cos\vartheta =$	0,000	0,259	0,500	0,707	0,866	0,966	1,00

Hieraus leitet man die Kurve DA ab (Fig. 125) und findet aus ihr für y_0 bis y_{20}:

402 390 377 364 350 337 321 305 286 266 244
216 183 140 90 45 19 5 3 1 0 HK,

so daß

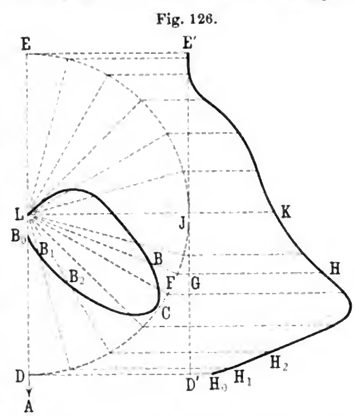
$$J_{s,o} = \frac{1}{20}\left\{y_0 + y_1 + \cdots + y_{20} - \frac{y_0 + y_{20}}{2}\right\} = 207 \text{ HK}.$$

Wenn man häufig solche Bestimmungen auszuführen hat, empfiehlt es sich, schon im voraus auf dem Koordinatennetz die in Fig. 125 punktiert gezeichneten Parallelen zur Ordinatenachse zu ziehen. Man hat dann nur nötig, die beobachteten $J(\vartheta)$ bzw. $\dfrac{J(\vartheta) + J(180-\vartheta)}{2}$ auf denselben abzutragen.

b) Verfahren von Rousseau[1]).

Man konstruiert die Kurve der räumlichen Lichtverteilung $B_0 B_1 B_2 \ldots B \ldots$ (Fig. 126) und beschreibt um L über der Lampenachse LA mit einem beliebigen Radius den Halbkreis DJE. Sodann zieht man von L durch den beliebigen Punkt B der Kurve den Radius LF, fällt von F auf die zu LA Parallele $D'E'$ das Lot FG und trägt auf die Verlängerung desselben die Strecke $GH = LB$ ab. In derselben Weise verfährt man mit den anderen Punkten B und verbindet die hierdurch erhaltenen Punkte H_0, H_1, $H_2 \ldots$ durch die Kurve $H_0 KE'$. Alsdann ist, wenn wir unsere Bezeichnungen beibehalten und JD' bzw. JK als Richtung der Abszissen- bzw. Ordinatenachse ansehen, J_s die Lichtstärke, welche durch die mittlere Ordinate der Kurve $H_0 KE'$

Fig. 126.



[1]) C. r. des essais photométriques à l'exposition d'Anvers en 1885.

dargestellt wird. Ferner ist $J_{s,u}$ bzw. $J_{s,o}$ die durch mittlere Ordinate der Kurve $H_0 K$ bzw. KE' dargestellte Lichtstärke.

Die Kurven $H_0 KE'$, $H_0 K$, KE' entsprechen den Kurven CE, CD und DE in Fig. 123. Die Methode von Rousseau[1]) stimmt also in den Endkonstruktionen mit der zuerst angegebenen überein; sie ist aber wegen der vielen Zeichnungen umständlicher und ungenauer als die Methode *a*. Übrigens benutzte Rousseau anfangs nicht die in Fig. 126 konstruierte räumliche Lichtverteilungskurve, sondern eine solche, bei welcher die Verhältnisse von $J(\vartheta)$ zu dem größten Werte der $J(\vartheta)$ als Funktionen von ϑ aufgetragen waren.

C. Bestimmung der mittleren räumlichen Lichtstärke und der hemisphärischen Lichtstärken.

I. Durch Messung in vielen Ausstrahlungsrichtungen.

§ 128. Allgemeiner Überblick.

Bei Petroleumrundbrennern, Kerzen begnügt man sich zur Kennzeichnung der Lichtstärke zuweilen mit einer einzigen Messung in horizontaler Richtung. Bei elektrischen Lampen, Gasglühlichtlampen verfährt man insofern genauer, als man die mittlere horizontale Lichtstärke J_m bestimmt. Allein selbst die letztere Bestimmungsweise ist nur gerechtfertigt, solange es sich um den Vergleich von zwei Lampen derselben Art, z. B. elektrischen Glühlampen von derselben Schleifenform, handelt. Sie reicht aber nicht aus, sobald zwei Lampen verschiedener Art in bezug auf ihre Leistungsfähigkeit miteinander verglichen werden sollen. In diesem Falle muß man die *mittleren räumlichen Lichtstärken* J_s vergleichen. Es sind in den letzten 10 Jahren mehrere Vorrichtungen angegeben, welche durch eine einzige Messung oder nur wenige Messungen J_s zu bestimmen gestatten. Über diese Vorrichtungen wollen wir in den §§ 134 bis 137 sprechen.

In den meisten Fällen (hiermit wollen wir uns zunächst beschäftigen) mißt man auch noch heute die *mittleren Lichtstärken* $J(\vartheta)$ unter einer größeren Anzahl von *Poldistanzen* ϑ und berechnet J_s aus diesen Werten nach den in §§ 125 bis 127 angegebenen Methoden 1 bis 3. Nun wird $J(\vartheta)$ gefunden, indem man in einer hinreichenden Anzahl q gleich weit voneinander entfernter Meridiane unter der Poldistanz ϑ die einzelnen Lichtstärken $J(\vartheta, \varphi)$ bestimmt und aus den gefundenen Werten das Mittel nimmt. Am geeignetsten ist es, bei der Bestimmung sämtlicher $J(\vartheta)$ die gleichen Meridiane zu wählen. Für Berechnungen nach den Methoden 1 und 2

[1]) Diese Methode, welche dem Verfasser erst durch das Lehrbuch von Palaz bekannt geworden ist, ist somit älter als die von Liebenthal.

ist es am bequemsten, unter gleich weit voneinander entfernten Poldistanzen zu messen. Ist beispielsweise $q = 20$ und $n = 13$, so würde es bei Methode 2, § 126 heißen: Es ist in 20 um je 18° voneinander entfernten Meridianen und in jedem Meridian von 0° (Pol) bis 180° in Abständen von je 15° zu messen.

Wir haben also für diese photometrischen Messungen je zwei Operationen auszuführen, nämlich die Anordnung so zu treffen, daß 1. die unter der beliebigen Poldistanz ϑ ausgehenden Strahlen auf den Photometerschirm gelangen; daß 2. der Photometerschirm nacheinander in die verschiedenen Meridiane kommt. Zu diesem Zwecke ist es, wie bereits S. 269 erwähnt wurde, wünschenswert, daß man die Lampe um ihre Achse drehbar macht. In obigem Beispiele hat man also, wenn man im nächstfolgenden Meridian messen will, die Lampe um 18° zu drehen.

Von den bisher beschriebenen Photometern gestatten einige, nämlich die von Weber (§ 88), Mascart (§ 96), Martens (§ 99), Brodhun (§ 101), welche ein auf die zu messende Lampe zu richtendes Beobachtungsrohr besitzen, unmittelbar Messungen unter jeder beliebigen Poldistanz. Man kann aber auch mit den übrigen Photometern unter Benutzung einer gewöhnlichen geraden Photometerbank (§ 138) auskommen, wenn man den Photometerschirm in geeigneter Weise dreht (§ 129) oder Spiegel benutzt, welche die zu messenden Strahlen in horizontaler Richtung ins Photometer werfen (§ 130 und 131) oder wenn man die ganze Photometerbank um eine zu ihrer Längsrichtung senkrechte, horizontale Achse so dreht, daß die Längsrichtung in die Richtung der zu messenden Strahlen fällt. Diese letztere Anordnung ist indessen sehr umständlich und nur dann einwandsfrei, wenn eine elektrische Lampe (also keine Flamme) als Vergleichs- bzw. Normallampe benutzt wird; sie wurde früher in selteneren Fällen, z. B. von Siemens u. Halske, gebraucht, findet heute jedoch keine Anwendung mehr. Von einzelnen Photometrikern werden relative Messungen bevorzugt (§ 132). Sehr bequem lassen sich diejenigen elektrischen Glühlampen, welche sich nach allen Richtungen drehen lassen, unter Benutzung besonderer Stative photometrieren (§ 133).

§ 129. Neigung des Photometerschirmes.

a) Prinzip der Anordnung. Von Hartley[1]) wurde vorgeschlagen, den Photometerschirm P um eine horizontale Achse A (Fig. 127), welche in die Ebene des Schirmes fällt und durch seine Mitte geht, so zu drehen, daß die Strahlen LA der zu messenden Lampe L und die horizontalen Strahlen $L_n A$ der Normallampe L_n den Schirm unter den gleichen Winkeln treffen. Die photometrische Einstellung hat zu er-

[1]) Lum. Electr. 10, 58 (1883).

folgen, indem man L_n längs des horizontalen Armes NA verschiebt. L befindet sich senkrecht über oder unter NA, und A steht senkrecht auf NA. Nach erfolgter Einstellung ist, falls das Photometer gleichseitig ist,

$$J = \frac{r^2}{r_n^2} \cdot J_n \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

Dieser Vorschlag wurde von Dibdin [1]) und von Elster [2]) benutzt.

b) Bei dem Radialphotometer von Dibdin (Fig. 128) ist eine horizontale Grundplatte mit den beiden vertikalen Trägern B und B_1

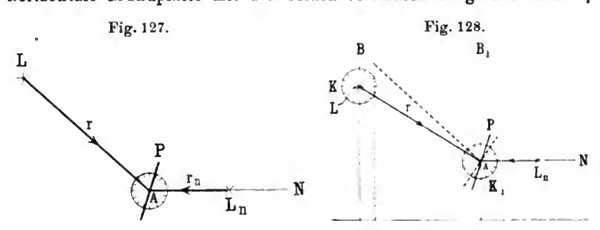


Fig. 127. Fig. 128.

versehen, von denen mindestens einer parallel mit sich verschiebbar ist. Auf B ist L in der Höhe verstellbar befestigt. B_1 trägt den ebenfalls in der Höhe verstellbaren Arm NA, auf welchem sich P und L_n befinden. Das Gehäuse von L ist mit der Drehungsachse A durch eine Stange verbunden, so daß die Mitte der stets aufrecht stehenden Lampe L um A in einem Kreisbogen herumgeführt werden kann. NA ist mit einer nach der oben angegebenen Formel berechneten Kerzenteilung (III auf S. 312) versehen, an der man unmittelbar die gesuchte Lichtstärke J abliest. Mittels der Teilkreise K und K_1 werden die Stange und der Photometerschirm in die gewünschte Richtung eingestellt. Krüss [3]) hat für diesen Apparat die von Rousseau angegebene Anordnung (Fig. 141, S. 296) vorgeschlagen, mittels deren sich P selbsttätig in die gewünschte Richtung einstellt.

c) Während bei dem Dibdinschen Photometer r konstant gehalten wird, wird bei dem Winkelphotometer von Elster L über dem Nullpunkte einer gewöhnlichen, geraden Photometerbank in einer Höhe h gleich der halben Länge der Photometerbank aufgehängt. P und L_n werden auf getrennten Wegen auf der Photometerbank verschoben. Dem Photometer ist eine Tabelle beigegeben, welche für jeden Ausstrahlungswinkel die Stelle der Bank angibt, auf welche man das Photometer einzustellen hat. Mittels zweier geeigneter Kerzen-

---

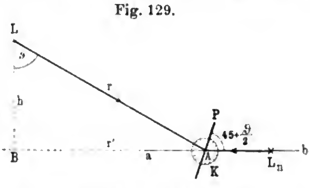
[1]) Journ. of Soc. of Chem. Ind., Mai 1884; ebenda April 1885.
[2]) J. f. G. u. W. 30, 1094 (1887).
[3]) Zentralbl. f. Elektrot. 10, 117 (1888).

teilungen (II und III auf S. 312) läßt sich dann die Rechnung leicht ausführen.

Die Anordnungen von Dibdin und Elster leiden an dem Übelstande, daß sie wegen der beschränkten Länge des drehbaren Armes LA (Fig. 127 und 128) bzw. der Bank, also wegen kleiner r, nur für kleine Lichtquellen anzuwenden sind; außerdem ist die Elstersche Methode nur für unterhalb der Horizontalen liegende Ausstrahlungsrichtungen zu benutzen.

d) Lampen von beträchtlicher Größe muß man außerhalb der Photometerbank ab aufstellen (Fig. 129). Diese Anordnung, welche größere Beobachtungsräume voraussetzt, wird in der Reichsanstalt gebraucht. Zu diesem Zwecke läßt sich L mittels eines Aufzuges (Fig. 94b, S. 228; Fig. 159, S. 325) in der Höhe verstellen, während sich ein das Photometer tragender Tisch auf Schienen in horizontaler Richtung bewegen läßt. Fällt man von L auf die Verlängerung von ab die Senkrechte $LB = h$ und setzt $BA = r'$, $LA = r$, so ist

Fig. 129.



$$tg\,\vartheta = \frac{r'}{h}; \quad r = \frac{r'}{\sin\vartheta} = \frac{h}{\cos\vartheta} \quad \ldots\ldots \quad 2)$$

Will man unter der Poldistanz ϑ beobachten, so hat man

1. den Photometerschirm so um A zu drehen, daß seine Ebene mit der Horizontalen den Winkel bildet

$$\alpha = 45 + {}^1/_2\,\vartheta \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

2. wenn man die Lampe an ihrem Orte stehen läßt (also bei gegebener Höhe h), A in den Abstand zu bringen

$$r' = h\,tg\,\vartheta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

oder wenn man das Photometer an seinem Orte stehen läßt (also bei gegebenem Abstand r'), L in die Höhe zu bringen

$$h = r'\cot\vartheta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

oder bei gegebenem Abstande r zu wählen

$$h = r\cos\vartheta; \quad r' = r\sin\vartheta \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

Beispiel. Eine in der Höhe $h = 4000$ mm aufgehängte Bogenlampe sei unter $\vartheta = 15^0$ zu photometrieren. Alsdann hat man nach Gleichungen 3) und 4) zu wählen $\alpha = 52{,}5^0$; $r' = 1072$ mm, so daß nach Gleichung 2) $r = 4141$ mm.

Ist $J_n = 10$ HK und ergibt die photometrische Einstellung $r_n = 798$ mm, so ist nach Gleichung 1) $J = \frac{4141^2}{798^2} \cdot 10 = 269$ HK.

Zur Einstellung des Photometerschirmes bedienen sich Krüss[1]), sowie Schmidt u. Haensch[2]) besonderer Schattenwerfvorrichtungen.

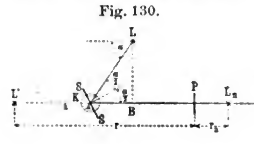
§ 130. Benutzung eines einzigen Spiegels.

Das Arbeiten mit Spiegeln ist nur einwandfrei, solange man mit kleinen Spiegeln auskommt, solange man also Lichtquellen von kleinen Dimensionen zu messen hat; denn nur kleinere Spiegel lassen sich in hinreichender Gleichmäßigkeit herstellen.

Methode 1.

Prinzip der Methode. L befindet sich senkrecht über oder unter der horizontalen Bankachse ab (Fig. 130). Durch den Spiegel SS, dessen horizontale Drehungsachse A in der Spiegelebene liegt und auf ab senkrecht steht, werden die Strahlen LA in der Richtung ab auf den Photometerschirm P geworfen. Ist der Winkel, den LA mit der Horizontalebene bildet, gleich α und $LB \perp ab$, so ist

Fig. 130.



$$LB = AB \cdot tg\,\alpha; \quad LA = \frac{AB}{\cos\alpha} = \frac{LB}{\sin\alpha},$$

und es ist ferner der Winkel, den die reflektierten Strahlen mit der Spiegelnormalen bilden, gleich $\frac{1}{2}\alpha$. Versieht man die Drehungsachse A mit einem Teilkreise K, der in der Richtung der Spiegelnormalen den Teilstrich 0^0 und in den beiden dazu senkrechten Richtungen die Teilstriche 90^0 trägt, so kann man mittels eines von A ausgehenden horizontalen Index unmittelbar die Hälfte des Ausstrahlungswinkels α gegen die Horizontalebene ablesen.

Ausführung der Messungen. Soll unter einem Winkel α gemessen werden, so stellt man den Index des erwähnten Teilkreises auf $\frac{1}{2}\alpha$ und verschiebt L in der Höhe oder SS in der Richtung ab oder L und SS zugleich, bis das am Orte L' erzeugte Spiegelbild von L in der Bankachse liegt. Genauer verfährt man, indem man den Seitenabstand AB und die Höhe LB so wählt, daß $LB = AB \cdot tg\,\alpha$ ist.

Die durch L mittels SS auf P erzeugte Beleuchtung ist so groß, als ob das Spiegelbild L', das in der Entfernung LA hinter A liegt, mit der Lichtstärke $J'_a = RJ_a$ leuchtet, wo J_a die Lichtstärke von L in Richtung LA und R das Reflexionsvermögen des Spiegels für den Einfallswinkel $\frac{1}{2}\alpha$ bezeichnet. Photometriert man L mittels P und

[1]) J. f. G. u. W. 39, 265 (1896).
[2]) Katalog III, Photometrische Apparate, Berlin September 1904, S. 10.

Normallampe L_n und findet dabei die Einstellungen r ($= L'P = LA + AP$) und r_n, so ist $J'_a = c \frac{r^2}{r_n^2} J_n$ [vgl. Gleichung 6, S. 178], und

$$J_a = J'_a / R.$$

Ein Übelstand der Methode ist, daß man für jeden Winkel α die Größen r und R in Rechnung zu ziehen hat.

Die Bestimmung des Reflexionsvermögens R geschieht am bequemsten nach der in Fig. 131 skizzierten Methode. Auf der Bank ab befinden sich L_n, P und die vertikale Umdrehungsachse A, um welche sich die horizontale Schiene AB dreht, welche nahe ihrem Ende L_a trägt. Zunächst wird AB in die Richtung Aa gestellt und durch Verschieben von L_n eine photometrische Einstellung gemacht, wobei sich die Entfernung r_n ergeben möge. Sodann werden, unter Benutzung einer Kreisteilung, auf A der Spiegel SS und die Schiene AB so aufgesetzt, daß die Spiegelnormale mit ab und AB die gleichen Winkel φ bildet. Ergibt die photometrische Einstellung jetzt die Entfernung r'_n, so ist für das zu untersuchende gemischte Licht von L_a und für den Einfallswinkel φ

Fig. 131.

$$R = r_n^2 / r_n'^2;$$

denn L_a und das Spiegelbild von L_a befinden sich bei beiden Messungen an derselben Stelle der Bankachse.

Methode 2 [Hefner-Alteneck[1])].

L befindet sich in der Bankachse ab. Der Spiegel SS (Fig. 132) ist um die mit ab zusammenfallende Achse AB drehbar und gegen ab um 45° geneigt, so daß er in jeder Stellung die von L nahezu senkrecht zu ab ausgehenden und nahezu auf seine Mitte M fallenden Strahlen LM nahezu senkrecht auf die Mitte Q des hinreichend weit entfernten Photometerschirmes P reflektiert. Zwischen L und P befindet sich der Schirm D, welcher die direkten Strahlen von L abblendet.

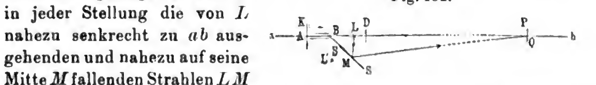


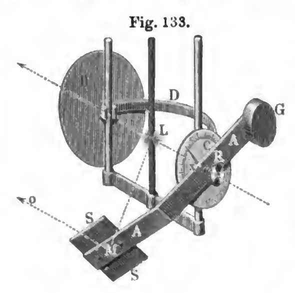
Fig. 132.

Fig. 133 gibt eine perspektivische Ansicht des von Hefner-Alteneck benutzten Apparates. SS ist an einem gebogenen, drehbaren Arme A befestigt. Der Träger des ganzen Apparates, der Bügel D, kann mittels der Schraube R an das Lampenstativ angeklemmt werden. C ist der Teilkreis zum Ablesen der Ausstrahlungsrichtung;

[1]) E. T. Z. 4, 445 (1883).

G das Gegengewicht für den Spiegel und den Arm *A*, welcher in jeder seiner Lagen durch geringe Reibung gehalten wird. Bei dieser Anordnung ist die Entfernung *LM* stets konstant, und der Winkel, unter welchem die Strahlen auf *SS* fallen, nahezu konstant (etwa 45°); deshalb braucht man nur das Reflexionsvermögen für diesen Winkel zu kennen.

Fig. 133.



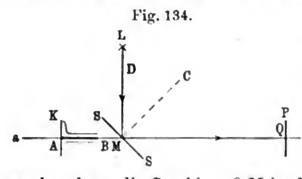
Bestimmung des Reflexionsvermögens für einen Einfallswinkel von 45°. Man mißt die Lichtstärke einer Lampe in einer bestimmten horizontalen Richtung 1. direkt (nach Wegnahme des Blendschirmes *D* und Verdeckung von *SS*); 2. mittels des Spiegelapparates (indem man den Spiegel vertikal stellt und die Lampe um ihre Achse um 90° dreht, so daß sie jetzt der Spiegelmitte dieselbe Seite wie vorher dem Photometerschirm zuwendet). Ergeben sich hierbei die Lichtstärken *J* und *J'*, so ist

$$R = J'/J.$$

Methode 3 [Perry und Ayrton [1])].

Der Spiegel *SS* (Fig. 134), dessen Mitte *M* in der Bankachse *ab* liegt, dreht sich um die mit *ab* zusammenfallende Achse *AB* und ist gegen *AB* um 45° geneigt. *L* befindet sich in der durch *M* senkrecht zu *ab* gelegten Ebene.

Fig. 134.



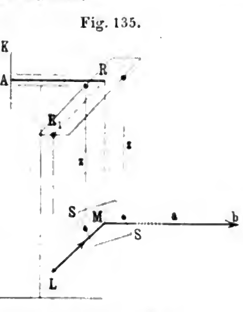
Um die Wirkungsweise des Spiegels besser übersehen zu können, wollen wir zunächst die Mitte *Q* des Photometerschirmes *P* als leuchtend voraussetzen. Es werden dann die Strahlen *QM* in der dazu senkrechten Richtung *MD* reflektiert werden. Drehen wir nun *SS* um *AB*, so wird *MD* stets in der Ebene bleiben, welche in *M* auf *ab* senkrecht steht. Umgekehrt, wenn man *L* in dieser Ebene in beliebiger Höhe aufstellt, so kann man durch geeignete Drehung von *SS* die reflektierten Strahlen ins Photometer werfen; es tritt dies dann ein, wenn die Spiegelnormale in der durch *L* und *ab* gelegten Ebene sich befindet. Bei dieser Anordnung treffen die zu messenden Strahlen den Spiegel in *M* stets unter dem gleichen Winkel von 45°.

[1]) Phil. Mag. (5) 8, 117 (1880).

Konstanthalten des Abstandes LM. Die Rechnung vereinfacht sich, wenn man den Abstand LM stets konstant erhält. Dies läßt sich natürlich auf verschiedene Weise machen.

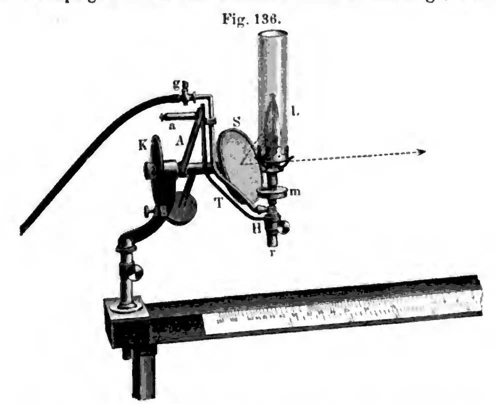
v. Hefner-Alteneck[1]) benutzte für Bogenlampen vielfach die in Fig. 135 skizzierte Anordnung. Senkrecht oberhalb der Bankachse ab und parallel zu dieser befindet sich die Drehungsachse AR des Armes RR_1, welcher sich in der auf ab senkrecht stehenden Ebene auf und nieder bewegen läßt. R liegt senkrecht über der Spiegelmitte M; an R_1 ist L mittels Kette oder in anderer Weise so aufgehängt, daß der Abstand $R_1 L$ gleich RM ist. Ferner ist der Arm RR_1 durch zwei Zugstangen zz derart mit dem Spiegel verbunden, daß er sich stets gleichmäßig mit diesem drehen muß. Wird RR_1 gedreht, so beschreibt die Lampenmitte, da die Lampe stets vertikal hängt, einen Kreisbogen um M.

Fig. 135.



Apparat für Gaslampen von Krüss[2]) (Fig. 136). An der Achse des Spiegels S ist ein seitlicher Arm A befestigt, an dessen

Fig. 136.



Ende sich die horizontale Achse a befindet. An dieser Achse und um dieselbe leicht drehbar hängt der Träger T für den Brenner L.

[1]) E. T. Z. 4, 445 (1883).

[2]) J. f. G. u. W. 41, 253 (1898).

Am Ende von T befindet sich eine Hülse H für das Rohr r und die auf r aufgesetzte und um die Achse von r drehbare, mit einer Teilung versehene Trommel m, auf welche der Brenner L aufgeschraubt wird. r wird so lange in der Höhe verstellt, bis die Mitte von L in der Verlängerung von a liegt. Besitzt die Bank eine Teilung, und soll diese Teilung auch bei dieser Anordnung gültig sein, so muß man die Spiegelvorrichtung so aufstellen, daß das Bild von L senkrecht über dem Anfangspunkt der Teilung liegt.

Bei dieser Anordnung macht sich, worauf übrigens Krüss selbst aufmerksam macht, der durch den Gaszuleitungsschlauch g ausgeübte seitliche Zug störend bemerkbar, durch den die Lampe leicht aus ihrer vertikalen Stellung gebracht werden kann; außerdem müssen das Photometer und die Normallampe verhältnismäßig hoch aufgestellt werden, weil sonst bei Messungen unter kleineren Ausstrahlungswinkeln als 40^0 gegen die nach oben gehende Vertikale der Brenner an die Photometerbank stößt. Diesen Übelstand vermeidet Krüss bei der auf der folgenden Seite zu besprechenden Anordnung.

Bereits früher hat Drehschmidt[1]) eine ähnliche Spiegelanordnung konstruiert. Dieselbe wird außerhalb der Photometerbank auf einem besonderen Stativ aufgestellt.

In der Reichsanstalt wird die zu messende Lampe bei Messungen nach dieser Methode unter Benutzung eines Aufzuges im Kreise um die Spiegelmitte herumgeführt.

§ 131. Benutzung von zwei und mehreren Spiegeln.

Methode 1 (Brodhun, S. 227).

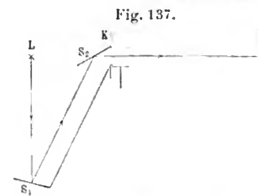


Fig. 137.

Die von L (Fig. 137) kommenden Strahlen fallen auf den Spiegel S_1 und werden durch einen zweiten, mit S_1 fest verbundenen Spiegel S_2 in der Richtung der Bankachse auf den Photometerschirm P geworfen. Das Spiegelsystem ist um eine mit der Bankachse zusammenfallende Achse drehbar. K ist ein Teilkreis.

Methode 2 [Laporte[2]), Matthiews[3])].

Für Bogenlampen, welche mit Glocken und Reflektoren ausgestattet sind, werden statt eines Spiegels nach der Hefner-Alteneckschen Methode deren zwei, SS und $S'S'$ (Fig. 138), gebraucht, welche links und rechts von L (vom Photometer P aus gesehen) symmetrisch zur Lampenachse aufgestellt werden. Mithin mißt man für jeden

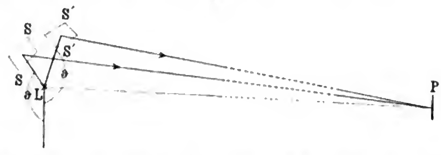
¹) J. f. G. u. W. 39, 765 (1896).

²) L'Éclair. électr. 20, 302 (1899).

³) El. World 35, 824 (1900).

Winkel ϑ (mit Ausnahme in der Nähe von $\vartheta = 0$ und 180^0, wo nur ein Spiegel verwendet werden kann, während der andere verdeckt und

Fig. 138.



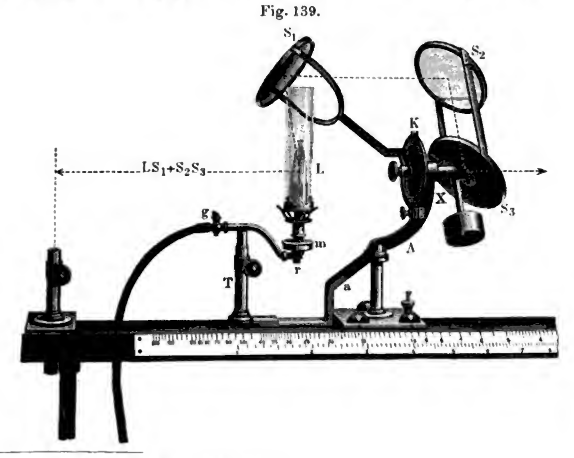
nach einer beliebigen anderen Richtung verschoben wird) die Summe der Lichtstärken in zwei diametral gegenüberliegenden Meridianbenen, also $J(\vartheta, \varphi) + J(\vartheta, 180 + \varphi)$.

Durch diese Anordnung wird erstens die Beobachtungszeit verkürzt und zweitens bei einem wandernden Lichtbogen eine gleichmäßigere Beleuchtung des Photometerschirmes als mit nur einem Spiegel erzielt; denn bei einem solchen Bogen ändert sich die Lichtstärke in der beliebigen Richtung ϑ, φ fortwährend, aber doch so, daß die oben angegebene Summe sich nicht wesentlich ändert.

Methode 3 [Krüss[1]].

Die zu messende Lampe L (Fig. 139) steht auf der Photometerbank fest. Die senkrecht zu dieser ausgehenden Strahlen werden

Fig. 139.



[1]) J. f. G. u. W. 41, 253 (1898).

durch den Spiegel S_1 parallel zur Bankachse, durch den Spiegel S_2 senkrecht zur Bankachse und durch den Spiegel S_3 in die Bankachse reflektiert. Die drei Spiegel sind um die in die Bankachse eingestellte Achse x drehbar angeordnet. Damit eine Teilung auf der Photometerbank ohne weiteres gebraucht werden kann, hat man L im Abstande $L S_1 + S_2 S_3$, welcher gleich dem doppelten Abstande der Spiegel S_2 und S_3 ist, vor dem Nullpunkte aufzustellen.

Genau nach demselben Prinzip hat Herschkowitsch[1]) einen Apparat konstruiert, bei welchem die drei Spiegel in ein Gehäuse eingeschlossen sind. Bei beiden Anordnungen kann man das vertikal nach oben gehende Licht nicht photometrieren, weil dann der Spiegel S_1 und bei Herschkowitsch vielleicht auch noch die beiden anderen Spiegel durch die Flammenhitze gesprengt würden.

Methode 4 [Sharp[2])].

Statt eines Satzes von drei Spiegeln werden deren zwei, S_1, S_2, S_3 und S_1', S_2', S_3' (Fig. 140 a und b), gebraucht, welche die von L in zwei

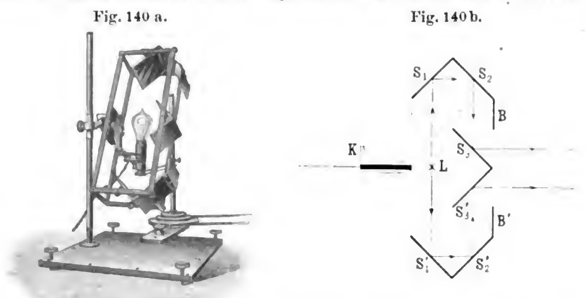


Fig. 140 a. Fig. 140 b.

diametral gegenüberliegenden Richtungen ausgehenden Strahlen in Richtung der Bankachse reflektieren. B und B' sind Blendschirme. Die Lampe steht aufrecht und rotiert mittels Elektromotors so schnell (ungefähr vier- bis fünfmal in der Sekunde), bis das Flimmern (S. 205) im Auge aufhört. Es wird hier also die Summe der mittleren Lichtstärken in den zwei Poldistanzen ϑ und $(180 - \vartheta)$, also $J(\vartheta) + J(180 - \vartheta)$ gemessen. Der Strom wird durch zwei Schleifkontakte zugeführt.

Sharp nennt den Apparat ein Universalinstrument. Um die mittlere horizontale Lichtstärke direkt, d. h. ohne die Spiegel, zu bestimmen, entfernt man S_3 und S_3' und läßt L rotieren. Fügt man

[1]) J. f. G. u. W. 44, 650 (1901).
[2]) Z. f. Instrk. 20, 225 (1900).

dann die beiden Spiegel wieder ein und stellt den Spiegelrahmen horizontal, so läßt sich das Mittel aus den Reflexionsvermögen der beiden Spiegelsätze bestimmen. Wenn man die räumliche Lichtverteilung bzw. die Verteilung in einem bestimmten Meridian bestimmen will, verdeckt man den einen Spiegelsatz und mißt die rotierende bzw. stillstehende Lampe mittels des anderen. Zur Bestimmung der Lichtverteilung in der Horizontalen dreht man die Lampe nacheinander um gleiche Winkel und benutzt hierzu eine auf der Schnurscheibe angebrachte Teilung.

§ 132. Relative Messungen.

a) Prinzip der Messungen.

Mittels der vorher beschriebenen Methoden wurden Messungen in verschiedenen Ausstrahlungsrichtungen unter Benutzung einer Normallampe ausgeführt. Bei der jetzt zu erwähnenden, von Rousseau angegebenen Methode fällt für die eigentlichen Messungen die Normallampe fort; es werden nämlich die Lichtstärken in beliebigen Richtungen einer Meridianebene direkt mit der Lichtstärke in der in derselben Meridianebene liegenden horizontalen Richtung, also $J(\vartheta, \varphi)$ mit $J(90, \varphi)$ verglichen. Natürlich hat man durch eine besondere Messung $J(90, \varphi)$ mittels einer Normallampe zu bestimmen.

Diese Methode, welche für Bogenlicht bestimmt ist, hat den Vorzug, daß man es immer mit gleichgefärbten Vergleichsfeldern zu tun hat. Ferner machen sich bei einem wandernden Lichtbogen Lichtstärkenschwankungen nicht so störend wie bei den meisten vorher beschriebenen Methoden bemerkbar, weil beide Vergleichsfelder gleichzeitig ungefähr dieselben Schwankungen zeigen. Allerdings ist die horizontale Richtung für den Vergleich nicht geeignet, weil sich die Lichtstärke in der Nähe der horizontalen Richtung (vgl. die Kurve in § 149) verhältnismäßig schnell mit der Richtung und außerdem mit der Gestalt des Kraters ändert. Geeigneter als Vergleichsrichtung ist eine solche unter der Poldistanz von etwa 45^0. Aber selbst bei dieser Richtung ändern sich, wie bereits angedeutet, die beobachteten Lichtstärkenverhältnisse noch mit der Zeit. Außerdem liegt eine Fehlerquelle noch darin, daß die Lichtverteilung nicht in allen Meridianen die gleiche ist.

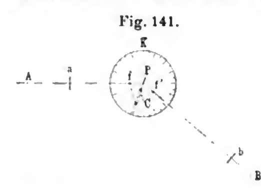
b) Anordnung von Rousseau[1])

in der ihr von Krüss[2]) gegebenen Form besteht aus einer vertikalen geteilten Kreisscheibe (Fig. 141) und drei um den Mittelpunkt von K drehbaren und am Rande von K feststellbaren Armen A, B und C.

[1]) Comptes rendus des travaux du Comité international des essais électriques de l'Exposition d'Anvers, p. 85; vgl. Fr. Vogel, E. T. Z. 8, 31 (1887).
[2]) E. T. Z. 8, 356 (1887).

Auf A und B lassen sich die beiden aus demselben Stück geschnittenen Spiegel a und b längs einer Millimeterteilung verschieben. Von f und f' gehen Führungsstangen aus, die den dritten Arm C durch eine in einem Schlitz verlaufende Gleitvorrichtung immer in der Halbierungslinie des von A und B gebildeten Winkels halten. C trägt den Bunsenschen Photometerschirm P; (Rousseau benutzte statt dessen ein Schattenphotometer). Bei der Messung wird die Mitte von L hinter der Mitte der Scheibe aufgestellt, der Arm A horizontal gestellt, B in die gewünschte Ausstrahlungsrichtung gebracht und durch Verschieben der Spiegel in die Entfernungen r_a und r_b vom Mittelpunkte der Scheibe eine photometrische Einstellung gemacht. Alsdann ist

Fig. 141.

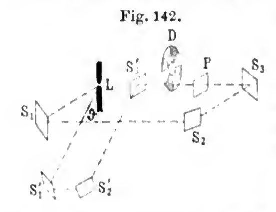


$$J(\vartheta, \varphi) = \left(\frac{r_b}{r_a}\right)^2 J(90, \varphi).$$

c) Anordnung von Fleming.

Fleming[1]) benutzt zwei nach Krüssschem Prinzip (S. 293) angeordnete Spiegelsätze S_1, S_2, S_3 und S_1', S_2', S_3' (Fig. 142). Der erste Satz steht fest und wirft die horizontalen Strahlen von L auf die rechte Seite des Photometerschirmes P. Der zweite drehbare Spiegelsatz wirft die unter der Poldistanz ϑ ausgehenden Strahlen auf die linke Seite von P. Die photometrische Einstellung erfolgt mittels des rotierenden Sektors D, dessen Sektorenbreite nach einer von Abney angegebenen Anordnung (S. 207) während der Rotation geändert werden kann.

Fig. 142.



Auch Carter[2]) beschreibt eine ähnliche Methode.

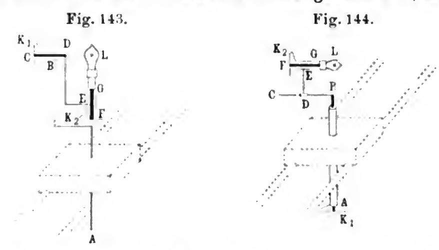
§ 133. Stative für elektrische Glühlampen.

Prinzip der Anordnung. Man dreht die Lampe nacheinander um ihre eigene Achse und eine zu ihr senkrechte Achse. Beide Achsen schneiden sich in der Bankachse. Die Lampenmitte wird in diesen Schnittpunkt gebracht, so daß sie stets an demselben Orte bleibt. Die Achsen sind mit den Teilkreisen K_1 und K_2 versehen. Falls die Bank mit einer Kerzenteilung versehen ist, bringt man den Schnittpunkt der Achsen senkrecht über den Nullpunkt der Teilung.

[1]) Electrician (2) 50, 481 (1902/1903).
[2]) Electrical Review 47, 44 (1900).

Bei dem Lampenstativ von Krüss [1]) (Fig. 143), welches im wesentlichen mit den Stativen von Rousseau, Heim [2]) und dem Franklin-Institut übereinstimmt, nimmt der auf die Photometerbank gesetzte, in der Höhe verstellbare gebogene Träger AB die horizontale, senkrecht zur Bankachse liegende Drehungsachse CD auf. Die letztere ist durch den (in der Figur senkrecht nach unten gezeichneten) gebogenen Arm DE mit der Hülse für die zweite Drehungsachse FG, welche mit

Fig. 143. Fig. 144.



der Lampenachse zusammenfällt, verbunden. Bei der Drehung der Lampe um CD durchstreicht FG also die durch die Bankachse gehende Vertikalebene.

Bei dem in Fig. 144 skizzierten Stativ, das in der Reichsanstalt gebraucht wird, trägt die vertikale, in der Höhe verstellbare, durch die Bankachse gehende Umdrehungsachse AB die horizontale Schiene BC, auf welcher sich mittels eines Gleitstückes der vertikale Träger DE der Hülse E verschieben läßt. Die letztere enthält die zweite horizontale, in die Lampenachse fallende Umdrehungsachse FG. Bei Drehung um AB durchstreicht also FG die durch die Bankachse gehende Horizontalebene.

II. Durch eine einzige Messung oder wenige Messungen.

§ 134. Lumenmeter von Blondel [3]).

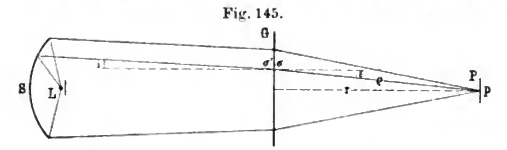
Modell 1.

Prinzip des Apparates. Man läßt die Strahlen von L auf einen Hohlspiegel S (Fig. 145) fallen, welcher sie möglichst senkrecht auf einen durchscheinenden Schirm G aus einer orthotropen Substanz (S. 88) reflektiert. Auf dem Schirme entsteht ein Lichtfleck, dessen Lichtstärke J in zum Schirme senkrechter Richtung mittels irgend eines

[1]) Zentralbl. f. Elektrotechnik 9, 746 (1887). E. T. Z. 8, 356 (1887).
[2]) E. T. Z. 7, 384 (1886).
[3]) L'Éclair. électr. 3, 57, 406, 538, 583 (1895); C. R. 120, 311 u. 550 (1895).

Photometers P und einer Normallampe durch Verschieben der letzteren bestimmt wird. Bezeichnen wir den auf den Spiegel fallenden Licht-

Fig. 145.



strom mit Φ, den hiervon nach dem Schirme reflektierten mit Φ', so ist

$$J = c\,\Phi' \qquad \text{1)}$$

wo c eine gewisse Konstante ist.

Ist die Anordnung so getroffen, daß alle Strahlen von L den Spiegel unter nahezu dem gleichen Einfallswinkel treffen, so ist das Reflexionsvermögen des Spiegels für alle Strahlen das gleiche. Bezeichnen wir dasselbe mit R, so ist dann

$$\Phi' = R\,\Phi \qquad \text{2)}$$

Demnach wird, wenn wir die Konstante

$$1/c\,R = C$$

setzen,

$$\Phi = C \cdot J \qquad \text{3)}$$

Mit anderen Worten: Der auf den Spiegel auffallende Lichtstrom Φ ist proportional der Lichtstärke J.

Beweis von Gl. 1). Es sei σ ein Element der dem Spiegel abgewandten Seite (Rückseite) von G; E' die Beleuchtung des σ gegenüberliegenden Elementes σ' der Vorderseite von G; ϱ der Abstand zwischen σ und der Mitte p des Photometerschirmes P; ε der Winkel, welchen die Richtung ϱ mit der Normalen von σ bildet; r der Abstand zwischen den Mitten von G und P. — Nun ist nach S. 88 die Lichtstärke von σ unter dem Ausstrahlungswinkel ε

$$k \cdot \cos^n \varepsilon \cdot E' \sigma,$$

wo n eine zwischen 1 und 2 liegende Zahl und k eine von dem Einfallswinkel i der auf σ' auffallenden Strahlen unabhängige Konstante ist, so lange i kleiner als 20^0 ist. Mithin ist die vom gesamten Lichtfleck auf P in p erzeugte Beleuchtung

$$E = k \sum \frac{\cos^{n+1} \varepsilon \cdot E' \sigma}{\varrho^2},$$

wo sich die Summation über alle Elemente σ des Lichtflecks zu erstrecken hat. Da $\varrho = r \cos \varepsilon$, so wird

$$E = \frac{k}{r^2} \cdot \sum \cos^{n+3} \varepsilon \cdot E' \sigma.$$

Setzt man für $\cos^{n+3}\varepsilon$ den Mittelwert A, so ist sehr nahezu

$$E = \frac{k\,A}{r^2} \sum E'\sigma,$$

und da $\sum E'\sigma = \Phi'$ ist, so wird $E = \frac{k\,A}{r^2} \cdot \Phi'$, oder wenn wir die Konstante $k\,A = c$ setzen,

$$E = \frac{c\,\Phi'}{r^2}.$$

Mithin verhält sich der Lichtfleck, wie wenn er in zu G senkrechter Richtung und für die hinreichend große Entfernung r mit der durch Gleichung 1) gegebenen Lichtstärke leuchtet.

Beschreibung des Apparates. S (Fig. 146) ist eine undurchsichtige, innen geschwärzte Kugel, in deren Mittelpunkt die Mitte der

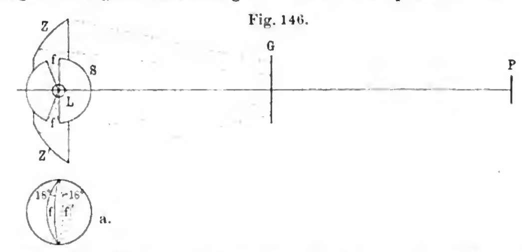


Fig. 146.

zu messenden (kreisförmig gezeichneten) Lampe L versetzt wird. S besitzt zwei gegenüberliegende Ausschnitte f und f' in der Form von Kugelzweiecken (s. auch Fig. 146 a) von je 18°. Die durch diese Ausschnitte austretenden Strahlen fallen sämtlich unter nahezu gleichen Einfallswinkeln auf die kleine spiegelnde Zone ZZ' eines Umdrehungsellipsoids (Durchmesser etwa 60 cm) und werden von dieser auf den 1 qm großen durchscheinenden Zerstreuungsschirm [1]) G reflektiert. Der letztere besteht aus Milchglas oder aus einem zwischen Glas in einem Rahmen eingeklemmten Papierblatt. Die Lampenmitte befindet sich in dem einen Brennpunkte von ZZ'; G geht durch den anderen 3 m entfernten Brennpunkt. Der Lichtfleck wird dann nicht sehr ausgedehnt (20 bis 50 cm im Durchmesser bei Lichtbogen). P ist ein beliebiges Photometer.

Ausführung der Messungen. Die Summe der beiden Ausschnitte beträgt, da jeder einen Öffnungswinkel von 18° besitzt, $^1/_{10}$ der Oberfläche der Kugel S. Mithin erhält man mittels einer einzigen Messung den gesamten Lichtstrom, wenn man die Lichtstärke J des

[1]) Für schwache Lichtströme benutzt Blondel auch diffus reflektierende Schirme.

Lichtfleckes bestimmt und den hieraus mittels Gleichung 3) berechneten Lichtstrom mit 10 multipliziert. Hierbei ist angenommen, daß das Licht symmetrisch um die vertikale Lampenachse verteilt ist oder daß man die Lampe sehr schnell um ihre eigene Achse rotieren läßt. Anderenfalls muß man die Lampe zehnmal nacheinander um je 18° drehen und die zehn Werte addieren. Kommt es nicht auf größere Genauigkeit an, so kann man sich mit zwei Messungen begnügen, indem man nach der ersten Messung die Lampe um 90° dreht und die Summe beider Werte mit 5 multipliziert.

Die Bestimmung der Instrumentalkonstante C geschieht empirisch. Bei einem Versuche ersetzte Rey L durch eine Carcellampe und bedeckte f und f' durch zwei Kugelkappen, welche symmetrisch zu der durch die Lampenmitte gelegten Horizontalebene angeordnet waren und zwei äquatoriale Zonen von zusammen $^1/_{40}$ der Kugeloberfläche frei ließen; der räumliche Ausstrahlungswinkel war also gleich $\pi/10$. Es ergab sich die Lichtstärke der durchscheinenden Platte zu $J = 0{,}0084$ Carcel.

Da nach Blondel 1 Carcel = 9,62 bougies décimales ist (S. 140), so fiel auf den Spiegel der Lichtstrom $\Phi = {}^1/_{10}\pi\ 9{,}62 = 3{,}02$ Lumen, mithin war für diesen Apparat $C = \frac{3{,}02}{0{,}0084} = \frac{1}{0{,}0028}$.

Genauigkeit. Blondel schätzt den Gesamtfehler auf 2,5 bis 3 Proz., falls der Abstand zwischen P und G mindestens 7,5 mal so groß wie der Durchmesser des Lichtfleckes ist.

Modell 2.

Blondel setzt in die Kugel S eine zu dieser konzentrische Kugel S' aus einer durchscheinenden, gut zerstreuenden Substanz und läßt den Zerstreuungsschirm G fort. Die von S' ausgehenden und durch die Ausschnitte f und f' gehenden Strahlen werden durch den Spiegel direkt auf den Photometerschirm P geworfen, welcher sich im zweiten Brennpunkte befindet. Die auf P erzeugte Beleuchtung ist dem gesamten Lichtstrome nur dann proportional, wenn die Lichtverteilung in allen Meridianebenen die gleiche ist. Diese Methode ist, wie Blondel selbst zugibt, ungenauer als die vorige.

Modell 3.

Modell 1 wird dadurch vereinfacht, daß der Schirm G fortgelassen und der elliptische Spiegel Z durch einen Kegelmantel von 80° Öffnung ersetzt wird, welcher mit einer diffus reflektierenden Substanz (weißem Papier oder weißem Anstrich) bedeckt ist. Der Apparat ist zwar billiger, aber auch noch weniger genau als Modell 2.

§ 135. Kugelphotometer von Ulbricht[1]).

Prinzip des Apparates. Im Innern einer Hohlkugel befinde sich die beliebige und beliebig gelegene Lichtquelle L, deren mittlere räumliche Lichtstärke J_s sei. Alsdann wird jedes Element der Innenfläche erstens durch die von L ausgehenden Strahlen, also direkt, und zweitens durch die vielfach an der Innenfläche reflektierten Strahlen, also indirekt, beleuchtet. Wenn diese Innenwand dem Lambertschen $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Gesetze (S. 78) gehorcht und an allen Stellen das gleiche diffuse Reflexionsvermögen M besitzt, so ist die indirekte Wandbeleuchtung E an allen Stellen die gleiche und zwar proportional J_s.

Beweis. Es mögen bezeichnen:

s und s' zwei beliebige Elemente der Innenfläche; d den Abstand beider; φ die beiden gleichen Winkel, welche die nach s und s' gezogenen Kugelradien mit d einschließen; ϱ den Kugelradius; $E's$ einen beliebigen und unter beliebigem Winkel auf s fallenden Lichtstrom.

Der Bruchteil M dieses Lichtstromes wird von s diffus zurückgeworfen. Dabei gelangt, da die auf das Quadratmeter bezogene Flächenhelle von s gemäß Gl. 1), S. 91 gleich

$$\frac{ME_1}{\pi}$$

ist, nach s' der Lichtstrom $\frac{ME_1}{\pi} \cdot \frac{ss' \cos^2 \varphi}{d^2}$, wofür, da $d = 2\varrho \cos \varphi$ ist, auch gesetzt werden kann $\frac{ME_1}{\pi} \cdot \frac{ss'}{4\varrho^2}$. Hierdurch erlangt s' die Beleuchtung

$$\frac{ME_1}{\pi} \cdot \frac{s}{4\varrho^2}.$$

Da im letzteren Ausdruck die Veränderlichen d und φ nicht vorkommen, so folgt: *Jedes Flächenelement s beleuchtet alle übrigen Flächenelemente s' gleichmäßig.* Mithin muß in dieser vollkommen diffus reflektierenden Kugel die indirekte Wandbeleuchtung an allen Stellen die gleiche sein, wie verschieden auch die direkte Beleuchtung an den einzelnen Stellen der Kugelwandung sein möge.

Nun ist der von L direkt ausgesandte, auf die gesamte Wandung fallende Lichtstrom $4\pi J_s$ (S. 270); hiervon wird der Lichtstrom $4\pi MJ_s$ zum erstenmal diffus reflektiert; von dem letzteren wird der Betrag $4\pi M^2 J_s$ von neuem, also zum zweitenmal, diffus reflektiert usf. Im

[1]) Ulbricht, E. T. Z. **21**, 595 (1900); **26**, 512 (1905); **27**, 50 u. 803 (1906); Bloch, ebenda **26**, 1047 u. 1074 (1905); Corsepius, ebenda **27**, 468 (1906); Monasch, ebenda **27**, 669, 695 u. 803 (1906). Vgl. Referat von Brodhun, Z. f. Instrk. **26**, 316 (1906).

ganzen fällt also nach unendlich vielen diffusen Reflexionen auf die Innenwand der Kugel der reflektierte Lichtstrom

$$4\pi J_s M(1 + M + M^2 + \cdots) = 4\pi J_s \cdot \frac{M}{1-M}.$$

Die hierdurch erzeugte gleichmäßige Beleuchtung E ist, da die Oberfläche der Kugel $4\pi\varrho^2$ ist,

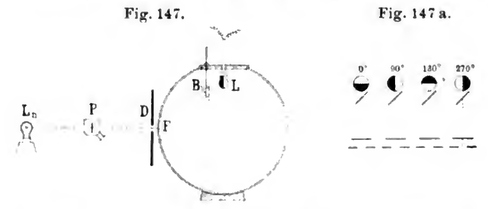
$$E = \frac{M J_s}{\varrho^2(1-M)};$$

d. h. es ist E, wie zu beweisen war, J_s proportional.

Beispiel. Ist $M = 0{,}8$ (vgl. Tabelle II, Anhang), $J_s = 16$ HK, $\varrho = 0{,}5$ bzw. 1 m, so ist $E = 256$ bzw. 64 Lux.

Anordnung des Apparates (Fig. 147). Eine starke, innen mattierte Milchglasglocke ist bis auf eine kleine, seitliche, kreis-

Fig. 147. Fig. 147 a.



förmige Fläche F innen mit einem weißen, matt geschliffenen Überzug aus Kreide und Wasserglas versehen und außen mit einem gleichfalls die Fläche F freilassenden, geschwärzten Gehäuse umgeben. Den gleichen Überzug haben der zum Verschluß der oberen Kugelöffnung dienende Deckel und die von demselben in das Innere ragenden stabförmigen Lampen- und Blendenhalter. Die zu messende Lampe (Glühlampe oder Bogenlampe) wird in den oberen Teil der Kugel eingeführt. Die direkten Strahlen von L werden durch eine kleine, weiße Scheibe B von der Fläche F ferngehalten, so daß F nur von indirektem Lichte beleuchtet wird. Alsdann erscheint die Außenseite von F in einer Flächenhelle e, welche der Beleuchtung E der Innenseite von F und demnach auch J_s proportional ist. Vor F wird eine Blende D gesetzt, deren kreisförmige Öffnung gleich f sei. Diese Öffnung leuchtet nach Gl. 2, S. 94 in zu f senkrechter Richtung mit der Lichtstärke $J = ef$, und da e proportional J_s ist, so ist umgekehrt

$$J_s = C \cdot J \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

wo C eine von dem Lichtdurchlässigkeitsvermögen des Milchglases der Kugel, von der Beschaffenheit des weißen Anstriches und von der Einwirkung der Konstruktionsteile (Blendschirm und Halter) abhängige Konstante des Apparates bezeichnet.

Die Lichtstärke J der Öffnung von D wird auf die gewöhnliche Weise, im vorliegenden Falle mittels des Photometers P und der Normallampe L_n, bestimmt.

Prüfung des Apparates. Nach Ulbricht gilt das $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz für den benutzten weißen Anstrich mit hinreichender Genauigkeit.

Um den Einfluß sehr ungleicher Lichtausstrahlung zu erkennen und zugleich eine Grundlage für die Beurteilung eines Bogenlichtes mit wanderndem Lichtbogen und ungleichmäßigem Kohlenabbrand zu gewinnen, brachte Ulbricht eine 16kerzige Glühlampe, deren Glasbirne halbseitig mit einem undurchsichtigen, weißen Anstrich versehen war, in die in Fig. 147a dargestellten vier Stellungen zum Blendschirm B und Milchglasfenster F. Er erhielt dann Werte für e, die sich verhielten wie 100 : 101,3 : 98,1 : 100.

Der Wert für 180° ist infolge des hier am stärksten wirkenden Einflusses des Schirmes B am kleinsten. Er weicht von dem Mittelwerte für die übrigen drei Stellungen um 2,3 Proz. ab. In dem Unterschiede von 1,3 Proz. zwischen den Messungen bei 90° und 0° bzw. 270° macht sich die absorbierende Wirkung des gleich in die Kugel mit eingeführten Bogenlampengestänges bemerkbar, welches bei 0° und 270° im Bereiche der direkten Bestrahlung, bei 90° aber nur im reflektierten Lichte lag.

Weitere Untersuchungen mit dieser Glühlampe über die Ortsveränderung der Lampe in der Kugel ergaben ebenfalls gute Resultate.

Der störende Einfluß des Blendschirmes B und der von Ulbricht als Fremdkörper bezeichneten, nicht leuchtenden Lampenteile (Lampenhalter und Gestelle) ist um so geringer, je kleiner ihre Oberfläche im Vergleich zur Kugelfläche ist. Für kleinere Kugeln empfiehlt Ulbricht durchscheinende Schirme B; für größere sind undurchsichtige, beiderseitig weiße Schirme in der Regel vorzuziehen. Am günstigsten ist es nach Ulbricht, den Schirm B und die zu messende Lampe L so anzuordnen, daß die in Richtung FBL hinter L liegenden Teile der Kugelwandung nicht zu stark von L beleuchtet werden. Nach Corsepius hat man Form und Stellung von B so zu wählen, daß weder F, noch ein ziemlich breiter Rand um F direktes Licht von L erhält. Der Einfluß der Fremdkörper ist nach Ulbricht von ihrer Lage nahezu unabhängig, dagegen von ihrer Gestalt und Absorptionsgröße abhängig. Für jede Armaturart ist deshalb die Konstante C besonders zu bestimmen.

Meßanordnung. Man bringt die zu messende Lampe L, z. B. eine Bogenlampe, oben, die als Normallampe dienende elektrische Glühlampe L_1 von der bekannten mittleren räumlichen Lichtstärke $J_{1,s}$ unten in der Kugel an und führt zunächst, während nur L_1 brennt, eine Eichung, sodann, während nur L brennt, eine Messung aus.

Ist die Lichtstärke der Öffnung der Blende D bei der Eichung gleich J_1, bei der Messung gleich J, so ist

$$C = J_{1,s}/J_1 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

die für die Lampe L (also Lichtbogen + Armatur) gültige Konstante des Photometers. Mithin ist nach Gl. 1)

$$J_s = J \cdot J_{1,s}/J_1 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

Bei dieser Anordnung ist durch Blenden dafür zu sorgen, daß L_1 weder das Fenster F, noch das Gestell von L direkt beleuchtet, und daß vom Lichtbogen kein direktes Licht nach F gelangt.

Ist L eine Lampe, deren Fremdkörper verhältnismäßig klein sind, z. B. eine elektrische Kohlenfadenlampe, so kann man L und L_1 nacheinander an dieselbe Stelle in der Kugel bringen.

Bei seinen Versuchen benutzte Ulbricht eine Kugel von 0,5 m Durchmesser. Von Bloch wurde mit einer Kugel von 1 m Durchmesser, von Monasch und Corsepius mit Kugeln von 2 m Durchmesser gearbeitet.

Bisher wurden nur elektrische Glühlampen und Bogenlampen mit dem Kugelphotometer gemessen. Ulbricht glaubt jedoch, daß es sich auch für Flammenlampen verwendbar machen läßt.

Auch zu Messungen der *unteren hemisphärischen Lichtstärke* $J_{s,u}$ läßt sich das Kugelphotometer benutzen. Zu diesem Zwecke führt Ulbricht durch den oberen Teil der Kugel einen horizontalen Schnitt und entfernt die abgeschnittene Kalotte ganz oder setzt sie an die alte Stelle zurück, nachdem er die innere Fläche mattschwarz (z. B. mit Samt) beschlagen hat. Punktförmige Lichtquellen bringt man genau in die Schnittebene; bei Lichtquellen von größeren Abmessungen, z. B. Bogenlampen mit Glocke und Reflektor, hat man eine bestimmte Eintauchtiefe in die Kugel zu wählen.

Das Kugelphotometer hat vor den anderen hier beschriebenen Photometern den Vorzug, daß es selbst für achsial unsymmetrische Lichtquellen die mittlere räumliche Lichtstärke durch *eine einzige Messung* zu bestimmen gestattet.

§ 136. Photomesometer von Blondel[1]).

Gegen die beiden folgenden Photometer ist prinzipiell einzuwenden, daß sie sich auf eine Näherungsformel, nämlich Gl. 8), S. 274 stützen.

Der Apparat von Blondel besteht aus $(4\,n - 2)$ (z. B. 22) Spiegeln, welche die Seitenflächen einer abgestumpften regelmäßigen, $4\,n$-seitigen Pyramide bilden, und gegen die horizontale Achse der Pyramide um je 45° geneigt sind; hierbei bleiben die oberste und die unterste Seitenfläche, deren Grundkanten horizontal stehen, frei. Die Mitte der

[1]) L'Éclair. électr. **2**, 385 (1895) und **8**, 49 (1896).

zu messenden Lampe (Bogenlampe ohne Glocke und Reflektor) befindet sich in der Pyramidenachse und zwar in der durch die Mitte der Spiegel gelegten Vertikalebene. In hinreichend großer Entfernung vom Reflektor ist der Photometerschirm senkrecht zur Pyramidenachse aufgestellt. Mithin werden alle Strahlen von L, welche (nahezu) senkrecht zu dieser Achse unter den $(2n - 1)$ Poldistanzen $\frac{90^0}{n}$, $2\frac{90^0}{n}, \cdots (2n-1)\frac{90^0}{n}$ (z. B. für $n = 6$ unter 15^0, $30^0, \ldots 165^0$) ausgehen, wie bei der Anordnung von **Hefner-Alteneck** (Fig. 132, S. 289), (nahezu) parallel zur Pyramidenachse nach der Mitte des Photometerschirmes P reflektiert. L ist von einer konzentrischen, undurchsichtigen Kugel S umgeben, welche mit einer größeren Anzahl von Schlitzen versehen ist. Die Schlitze sind von je zwei von oben nach unten verlaufenden Meridianen und je zwei Parallelkreisen begrenzt. Ihre Mitten liegen auf einer Anzahl p (z. B. 6) gleich weit voneinander entfernter Meridiane und haben die oben mitgeteilten Poldistanzen. Die Winkelbreite der Schlitze, d. h. der Längenabstand der sie begrenzenden Meridiane, beträgt auf dem Äquator b, unter der beliebigen Poldistanz ϑ $b \sin\vartheta$ Winkelgrade. Die Kugel wird um ihre vertikale Achse in so schnelle Drehung (etwa 200mal in der Minute) versetzt, daß das Auge einen kontinuierlichen Eindruck wahrnimmt. Die Helligkeit des Photometerschirmes ist dann J_s (nahezu) proportional.

Beweis. Die unter ϑ ausgehenden und von den beiden entsprechenden Spiegeln reflektierten Strahlen erzeugen, falls die Kugel S nicht vorhanden wäre, auf P die Beleuchtung $2RJ(\vartheta)/r^2$, wenn R das Reflexionsvermögen der Spiegel, r den Abstand zwischen Photometerschirm und dem Lampenbild von L bezeichnet, und wenn das Licht symmetrisch um die Lampenachse verteilt ist.

Ist u der Umfang des Parallelkreises ϑ der Kugel S, so hat jeder der auf diesem Kreise angeordneten p Schlitze die Breite $\frac{bu}{360}\cdot \sin\vartheta$; mithin ist die Gesamtbreite der p Schlitze $v = \frac{bpu}{360}\cdot\sin\vartheta$, so daß

$$\frac{v}{u} = \frac{bp}{360}\cdot\sin\vartheta.$$

Mithin wird bei der Rotation der Kugel die Stärke des durch diese p Schlitze gehenden intermittierenden Lichtes *proportional* $\sin\vartheta$ geschwächt. Die Gesamthelligkeit, welche der Photometerschirm durch Vermittelung aller Schlitze erreicht, ist, falls alle Spiegel das gleiche Reflexionsvermögen besitzen, so groß, als ob der Schirm die Beleuchtung

$$E = \frac{bp}{180}\,\frac{R}{r^2}\sum J(\vartheta)\sin\vartheta$$

erhielte, wofür sich wegen Gleichung 8), S. 274, auch schreiben läßt

$$E = \frac{bp}{45} \cdot \frac{n}{\pi} \frac{R^2}{r^2} \cdot J_s,$$

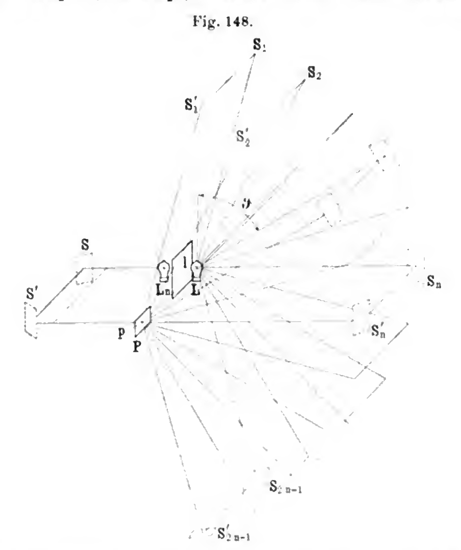
was zu beweisen war.

Mit dem Apparate läßt sich (und das bezeichnet Blondel als seinen Hauptvorzug) auch die räumliche Lichtverteilung bestimmen. Man ersetzt dann die undurchsichtige Kugel S durch eine andere S' mit $4n$ gleich großen Öffnungen, die derart angeordnet sind, daß immer ein anderer Spiegel bzw. ein anderes, unter gleicher Poldistanz liegendes Spiegelpaar wirksam wird, wenn man die Kugel S' um ihre vertikale Achse dreht.

§ 137. Integralphotometer von Matthiews[1]).

Prinzip des Apparates. In Fig. 148 bezeichnet L die zu messende Lampe (Glühlampe), welche durch einen Elektromotor

Fig. 148.



in schnelle Rotation um ihre Achse versetzt wird, l die Mitte von L, P den Photometerschirm, dessen Ebene durch l hindurchgeht,

[1]) Trans. Am. Inst. El. Eng. 18, 671 (1901); 19, 1465 (1902); Z. f. Bel. 9, 91 u. 335 (1903).

p die Mitte von P. Auf einen in der Figur nicht gezeichneten halbkreisförmigen Rahmen ist eine ungerade Zahl $(2n-1)$ (in der Figur 11) Spiegelpaare $S_1 S_1'$, $S_2 S_2' \ldots$, von denen in der Figur nur drei angedeutet sind, befestigt. Sie sind in gleichen Winkelabständen so angeordnet, daß sie die von L senkrecht zu lp unter den Poldistanzen $\alpha \left(=\frac{90}{n}\right)$, $2\alpha \ldots (2n-1)\alpha$ (also für 11 Spiegel unter 15°, 30° … 165°) ausgehenden Strahlen ins Photometer werfen. Wie aus dem Strahlengang zu ersehen ist, durchlaufen die Strahlen dabei je drei Seiten eines Rechtecks. Die unter der Poldistanz ϑ ausgehenden Strahlen treffen also den Photometerschirm, da derselbe vertikal steht, unter dem Einfallswinkel $i = (90 - \vartheta)$ bzw. $(\vartheta - 90)$, je nachdem ϑ kleiner oder größer als 90° ist.

Es sei ε der Ausstrahlungswinkel für die von P diffus reflektierten, beim Photometrieren in Betracht kommenden Strahlen. Ferner möge für die unter der Poldistanz ϑ von L ausgehenden Strahlen allgemein bezeichnen

- R_ϑ das Reflexionsvermögen des betreffenden Spiegelpaares,
- r_ϑ die Gesamtweglänge von L bis P,
- m_ϑ den Reflexionskoeffizienten von P für den Ausstrahlungswinkel ε.

Alsdann erlangt, da $\cos i = \sin\vartheta$ ist, P durch alle Spiegelpaare unter dem Ausstrahlungswinkel ε die Gesamtflächenhelle

$$e = \sum m_\vartheta R_\vartheta \frac{J(\vartheta)\sin\vartheta}{r_\vartheta^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Da sich R_ϑ und m_ϑ im allgemeinen etwas mit ϑ ändern, so wählt (korrigiert) Matthiews für jedes Spiegelpaar die Entfernung r_ϑ so, daß

$$\frac{m_\vartheta R_\vartheta}{r_\vartheta^2} = \frac{m_{90} R_{90}}{r_{90}^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

wo sich also der Index 90 auf das mit L und P in derselben Horizontalebene liegende Spiegelpaar $S_n S_n'$ bezieht.

Demnach geht Gleichung 1) über in

$$e = \frac{m_{90} R_{90}}{r_{90}^2} \sum J(\vartheta)\sin\vartheta,$$

so daß wegen Gleichung 8), S. 274

$$e = \frac{m_{90} R_{90}}{r_{90}^2} \frac{4n}{\pi} J_s \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Wenn alle Spiegel das gleiche Reflexionsvermögen besitzen würden und der Photometerschirm eine vollkommen orthotrope Substanz (S. 79), also m_ϑ konstant wäre, so hätte man nach Gl. 2) für alle Spiegelpaare den gleichen Abstand von der Achse lp zu wählen. Mithin würde das Paar $S_n S_n'$, wenn es um lp drehbar wäre, nacheinander mit den übrigen Spiegelpaaren zusammenfallen.

Bei einem Gipsschirm, wie er beim Lummer-Brodhunschen Photometer gebraucht wird, ist nach den Untersuchungen von Matthiews (S. 86) demnach für Einfallswinkel kleiner als 50° nur eine Korrektion von r_ϑ für das Reflexionsvermögen erforderlich; das letztere ist aber für alle Spiegel, da sie aus demselben Stücke geschnitten sind, nahezu gleich.

Konstruktive Ausführung des Photometers. Das Photometer besitzt außer dem Schirme P und den auf dem vertikalen Rahmen befestigten Spiegelpaaren noch einen horizontalen, mit einer Teilung versehenen Arm, welcher die Stelle der gewöhnlichen Photometerbank vertritt. Der horizontale Arm trägt auf der dem Rahmen abgewandten Seite die Normallampe L_n und das mittels Zahn und Trieb verstellbare Spiegelpaar SS'. L und L_n sind durch einen undurchsichtigen Schirm getrennt. Ein zweiter (nicht gezeichneter) Blendschirm hält die direkten von L und L_n ausgehenden Strahlen von P ab. Jedes Spiegelpaar ist auf dem Rahmen unabhängig von den anderen eingeschraubt.

Ausführung der Messungen[1]).

1. Bestimmung der mittleren räumlichen Lichtstärke J_s. Man macht durch Verschieben des Paares SS' eine Einstellung. Ist R das Reflexionsvermögen dieses Paares und r_n die Weglänge der Strahlen von L_n, so ist

$$J_s = \frac{\pi}{4\,n}\,\frac{r_{90}^2}{r_n^2}\,\frac{R}{R_{90}}\,J_n. \qquad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \qquad 4)$$

Trägt der horizontale Arm eine nach der Formel $T = \frac{\pi}{4\,n}\,\frac{r_{90}^2}{r_n^2}\,\frac{R}{R_{90}}$ berechnete Teilung, so wird

$$J_s = T \cdot J_n,$$

so daß man J_s durch eine leichte Umrechnung aus der an der Teilung abgelesenen Zahl findet.

2. Bestimmung des sphärischen Reduktionsfaktors (d. h. des Verhältnisses zwischen J_s und der mittleren horizontalen Lichtstärke J_m). In diesem Falle wird L_n und der zwischen L_n und L befindliche Blendschirm entfernt und wieder durch Verschieben von SS' eine Einstellung gemacht, wobei r die Weglänge der von SS' nach P reflektierten Strahlen von L sei. Dann ist

$$\frac{J_s}{J_m} = \frac{\pi}{4\,n}\,\frac{r_{90}^2}{r^2}\,\frac{R}{R_{90}} \qquad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \qquad 5)$$

3. Bestimmung der mittleren horizontalen Lichtstärke J_m. Es werden die Spiegel $S_n S_n'$ von dem Rahmen abgenommen und auf der verschiebbaren Zahnstange befestigt, so daß sie gleichzeitig mit SS' verschoben werden. Ferner wird die Lampe L_n wieder eingesetzt und durch Verschieben der vier Spiegel eine Einstellung gemacht.

---

[1]) Vgl. Dyke, Phil. Mag. (6) 9, 136 (1905).

Dann ist die Summe der Weglängen der Strahlen von L und L_n konstant gleich ϱ, so daß

$$J_m = \frac{(\varrho - r_n)^2}{r_n^2} \frac{R}{R_{90}} J_n \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Mittels des Photometers läßt sich auch die räumliche Lichtverteilung bestimmen.

Die eben besprochenen Messungen beziehen sich auf solche elektrische Glühlampen, welche sich in schnelle Rotation um ihre Achse versetzen lassen. Lampen, welche, wie z. B. Flammenlampen, eine solche Rotation nicht zulassen und welche achsial unsymmetrisch sind, hat man wie bei den Blondelschen Photometern wieder in einer Reihe von Meridianebenen zu messen.

Die Bezeichnung Integralphotometer ist für das Matthiewssche Instrument nicht ganz zutreffend, da dasselbe nicht integriert, sondern nur summiert. Wohl aber kann man das Lumenmeter von Blondel und das Kugelphotometer von Ulbricht als Integralphotometer [1]) bezeichnen.

Neuntes Kapitel.

Photometrische Einrichtungen.

§ 138. Die gerade Photometerbank.

Außer den im früheren besprochenen photometrischen Apparaten, Einheitslampen und Zwischenlichtquellen bedarf man für photometrische Messungen noch einer Reihe von Hilfsmitteln, auf welche wir jetzt, soweit es bisher noch nicht geschehen ist, näher eingehen wollen.

Fig. 149 zeigt eine nach den Angaben von Lummer und Brodhun hergestellte, in der Praxis viel gebrauchte gerade Photometerbank. Auf einem gußeisernen Untergestell f sind die beiden etwa 2,6 m langen Stahlrohre r gelagert. Um eine Durchbiegung der Rohre zu vermeiden, wie sie der Verfasser [2]) bei einer früher von ihm benutzten hölzernen Bank festgestellt hatte, ist das Gestell auch noch in der Mitte mit einer Stütze versehen. Die fünf Stellschrauben am Fuße von f dienen zum Horizontalstellen. Auf den Stahlrohren bewegen sich drei Wagen s, bestehend aus je einer viereckigen Metall-

[1]) Zu den Integralphotometern gehört auch noch das Photometer von Houston und Kennelly [Electr. World 27, 509 (1896)], auf dessen Beschreibung hier nicht näher eingegangen werden soll, da die Konstruktion desselben vom technischen Standpunkte aus zu erheblichen Bedenken Anlaß gibt.

[2]) E. T. Z. 9, 478 (1888).

platte und drei Rollen. Die Platten sind in der Mitte vertikal durchbohrt und mit einer starken Hülse versehen. In den Hülsen lassen sich durch Zahn und Trieb Stahlrohre t auf- und abbewegen, welche zur Aufnahme der auf dem Teller p stehenden Hefnerlampe L_2, der elektrischen Glühlampe L_1 und des Photometers P dienen. Die Wagen können an jeder Stelle festgeklemmt werden und tragen je eine Marke (Index) m, welche über der Millimeterteilung am vorderen Rohr r gleitet.

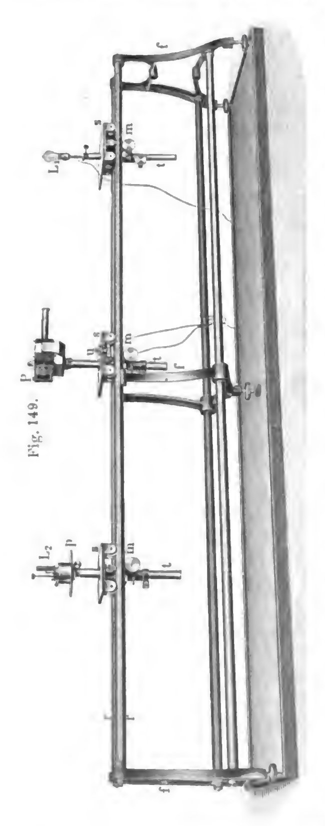


Fig. 149.

Die durch die Marken m und die Achsen der zugehörigen vertikalen Rohre t gelegten Ebenen stehen auf der Achse des Rohres r senkrecht. Auf diese Weise kann man die Abstände von der Mittelebene ab des Photometerschirmes P (Fig. 150) bis zu L_1 und L_2 direkt messen (näheres siehe nachstehendes Beispiel). Hierbei ist vorausgesetzt: 1. daß L_1, L_2 und P *richtig zentriert* sind, d. h. daß ihre Mitten in den Achsen der Rohre t liegen, und 2. daß diese Mitten sich in gleicher Höhe über der Bank befinden. Die Verbindungslinie dieser Mitten, welche der horizontalen Achse von r also parallel ist, nennt man die *optische Achse der Photometerbank* oder auch kurz die *Bankachse*.

Beispiel. Es seien L_1, L_2 und P (genauer die Indices m der Wagen für L_1, L_2 und P) auf die Teilstriche 2200,0 mm, 100,0 mm und 1427,6 mm der Längenteilung gestellt. Alsdann ist ab von L_1 und L_2 um 2200,0 — 1427,6 = 772,4 mm und 1427,6 — 100,0 = 1327,6 mm entfernt.

Für genaue photometrische Messungen hat man jedoch nicht diese Abstände, sondern die Abstände r_1 und r_2 (Fig. 150) der beiden

Begrenzungsebenen ef und cd des Photometerschirmes von L_1 und L_2 in Rechnung zu ziehen. Ist der Photometerschirm 4,0 mm dick, so erhält man die richtigen Abstände $r_1 = 770{,}4$ und $r_2 = 1325{,}6$ mm, wenn man die Abstände der Indices m um 2,0 mm verringert, oder, was dasselbe ist, wenn man so zählt, als ob L_1 und L_2 auf 2198,0 mm und 102,0 mm ständen [1]).

Fig. 150.

Bei den technischen Messungen der Reichsanstalt befinden sich die als Gebrauchsnormal dienende elektrische Lampe L_1 und das Photometer P stets auf der Photometerbank; dagegen werden die zu messenden Lampen in den allermeisten Fällen außerhalb der Bank in der Verlängerung der Bankachse auf einen in der Höhe verstellbaren Wagen gestellt. Näheres siehe S. 324, vgl. auch Fig. 94b, S. 228.

Die vom Deutschen Verein von Gas- und Wasserfachmännern unter der Bezeichnung Normalphotometer [2]) vorgeschlagene etwa 2,6 m lange hölzerne Photometerbank trägt nahe den Enden an den 2500 mm voneinander entfernten Stellen a und b (Fig. 151) zwei mittels Zahntriebes in der Höhe verstellbare Träger, in welche Halter für die zu messende Gaslampe L und die Hefnerlampe (bzw. die Zwischenlichtquelle) L_1 eingesetzt werden können. Ein auf Rollen laufender, festklemmbarer Schieber ist mit zwei 300 mm voneinander entfernten, in der Höhe nicht verstellbaren Trägern c und d versehen, deren Stellung auf der Bank je ein zugehöriger Index angibt. Als Photometer P wird ein Bunsensches oder Lummer-Brodhunsches mit dem Krüssschen Reflexionsprisma (Fig. 57, S. 176) empfohlen. Es sind zwei *Versuchsanordnungen* 1 und 2 (vgl. S. 163) vorgesehen. Die Lichtstärke der Hefnerlampe wird hierbei stets gleich 1 gesetzt; es wird also der Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Hefnerlampe nicht berücksichtigt, und zwar deshalb nicht, weil auch die Gaslampe in nahezu derselben Weise von der Feuchtigkeit abhängt.

Fig 151.

Versuchsanordnung 1. Es wird L in a, L_1 in b, P in c oder d aufgestellt und an einer bis 200 Kerzen gehenden *Kerzenteilung* I abgelesen, welche nach der Formel

$$p = r^2/(l - r)^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

[1]) Falls die Wagen für L_1 und L_2 nicht gegeneinander ausgetauscht werden, empfiehlt es sich, die Indices beider Wagen aus den S. 310 definierten Stellungen um die halbe Dicke des Photometerschirmes nach P hin zu versetzen. Man findet dann aus den Ablesungen an der Bank durch Subtraktion unmittelbar die richtigen Abstände r_1 und r_2.

[2]) J. f. G. u. W. 38, 691 (1895).

berechnet ist, wo p die Angabe eines beliebigen Teilstriches, r die Entfernung dieses Striches von a und $l = 2500$ mm den Abstand zwischen a und b bedeutet. Mithin steht

$$\text{im Abstande } r = \frac{l}{4}, \frac{l}{3}, \frac{l}{2}, \frac{2}{3}l, \frac{3}{4}l$$

$$\text{der Teilstrich } p = \frac{1}{9}, \frac{1}{4}, 1, 4, 9 \text{ Kerzen.}$$

Eine nach Formel 1) berechnete Tabelle ist unter Nr. VII, Anhang mitgeteilt.

Beim Photometrieren des Leuchtgases [1]) wird eine andere *Kerzenteilung* I empfohlen, bei welcher die unter 1 liegende Teilung durch die über 1 liegende ersetzt ist, so daß von dem Striche „1" in der Mitte die Teilung nach beiden Seiten bis zu 200 geht. In diesem Falle kann L auch in b, L_1 in a, P wieder in c oder d aufgestellt werden.

Versuchsanordnung 2. Es wird L in a fest aufgestellt, L_1 in d, P in c aufgesetzt, so daß L_1 und P zugleich verschoben werden. Abgelesen wird an der *Kerzenteilung* II, welche senkrecht über oder unter I liegt. Sie geht von 1 bis 50 Kerzen und ist nach der Formel

$$p = r^2/r_1^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

berechnet, wo $r_1 = 300$ mm ist. Mithin steht

im Abstande $r = 300,\ 600,\ 900$ mm
der Teilstrich $p = 1 \quad 4 \quad 9$ Kerzen.

Bei Benutzung der Hefnerlampe als Lampe L_1 ist wegen ihrer geringen Steifigkeit eine nur sehr mäßige Genauigkeit zu erzielen.

Falls statt der Hefnerlampe eine Zwischenlichtquelle von der Lichtstärke J_1 benutzt wird, sind bei beiden Versuchsanordnungen die an den Teilungen I und II abgelesenen Zahlen natürlich noch mit J_1 zu multiplizieren.

Eine Längenteilung ist für das Normalphotometer nicht vorgesehen, da mit demselben nur ganz bestimmte Messungen ausgeführt werden sollen. Falls eine Photometerbank allgemeineren Zwecken dienen soll, muß sie notwendig mit einer Längenteilung versehen sein, damit man die Abstände zwischen dem Photometer und den zu vergleichenden Lichtquellen messen und daraus das Lichtstärkenverhältnis berechnen kann.

Außer den beiden aufgeführten Kerzenteilungen sind für technische Zwecke auch noch andere im Gebrauch, z. B. eine *Kerzenteilung* (III), welche sich auf eine dritte Versuchsanordnung (vgl. S. 163) bezieht, bei welcher L und P feststehen, während L_1 verschoben wird.

---

[1]) J. f. G. u. W. 41, 842 (1898).

Diese Anordnung wird z. B. von Dibdin und Elster (S. 286) benutzt. Die Teilung ist nach einer der Formeln

$$p = 1/r_1^2;\ p' = r^2/r_1^2;\ p'' = J_1/r_1^2;\ p''' = r^2 J_1/r_1^2 \quad . \quad . \quad 3)$$

berechnet, wo r_1 veränderlich ist, dagegen r und J_1 konstant sind.

Eine nach der Formel $p'' = 10/r_1^2$ berechnete Tabelle ist unter Nr. VIII, Anhang, zusammengestellt.

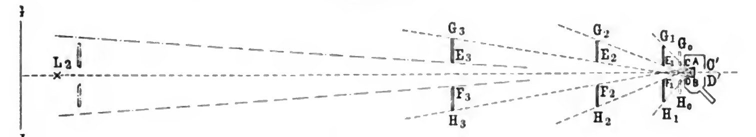
Solche Kerzenteilungen sind zwar sehr bequem, da sie das Rechnen möglichst überflüssig machen; allein sie haben den Übelstand, daß sie nur für die der Anordnung zugrunde gelegten Verhältnisse, z. B. bei Teilung I für eine bestimmte Banklänge, gültig sind.

§ 139. Abblenden fremden Lichtes.

Bei allen photometrischen Messungen darf der Photometerschirm nur von den Strahlen der beiden zu vergleichenden Lichtquellen beleuchtet werden. Es muß also alles fremde Licht abgeblendet werden. Hierzu verwendet man nach dem Vorgange der Reichsanstalt schwarze [am besten mit Samt[1]) überzogene] Schirme, und zwar 1. solche mit einer zentralen Öffnung, also sogenannte Blenden, 2. Schirme, welche keine Öffnung haben, sogenannte volle Schirme. Als Schirmmaterial empfiehlt sich Aluminiumblech oder zwei in gekreuzter Faserrichtung verleimte Holzplatten anzuwenden. Eine einfache Holzplatte, sowie Pappe verzieht sich leicht; außerdem ist Pappe zu wenig fest.

Prinzip der Aufstellung der Schirme. Man kann selbst beim Arbeiten mit großen Entfernungen mit verhältnismäßig wenigen

Fig. 152.



Schirmen alles fremde Licht abblenden, wenn man in folgender Weise verfährt. In Fig. 152 bezeichnen: AB den Photometerschirm; L_2 die eine Lampe; CD die L_2 zugewandte Lichteinströmungsöffnung des Photometergehäuses; GH einen hinter L_2 aufgestellten vollen Schirm; G_1H_1, GH_2 usw. Blenden mit den Öffnungen E_1F_1, E_2F_2 usw. Die Öffnungen müssen natürlich so groß sein, daß bei richtiger Stellung der Blenden jeder Punkt der Lichtquelle den ganzen Photometerschirm AB beleuchtet. Sind die Abmessungen von L_2 beispielsweise

[1]) Mattschwarzer Samt hat ein sehr geringes diffuses Reflexionsvermögen, nämlich 0,004 (s. Tabelle II, Anhang).

größer als die von AB, wie es meistens der Fall ist, so müssen die Öffnungen um so größer sein, je weiter sie von AB entfernt sind.

Zunächst bringt man die Mitten sämtlicher Blendenöffnungen, durch Verstellen in der Höhe, in die Bankachse. Sodann verschiebt man $G_1 H_1$ so lange, bis man längs der Kante H_1 nach D visierend, AB gerade noch sieht, bis also H_1 mit D und A auf derselben Geraden liegt. Hierauf stellt man nacheinander $G_2 H_2$, $G_3 H_3 \ldots$ so auf, daß sich H_2 in der Verlängerung von AF_1, H_3 in der Verlängerung von AF_2 usf. befindet. Die richtige Aufstellung der Schirme ist beendet, wenn man von der Kante H des vollen Schirmes GH aus den Photometerschirm AB nicht mehr sieht. Wenn man jetzt zur Kontrolle AB herausnimmt und von der zweiten Lichteinströmungsöffnung $C'D'$ des Photometers aus nach der Lampe L_2 blickt, so muß man die ganze wirksame Lichtquelle (z. B. bei elektrischen Glühlampen: Glühfaden und Birne, bei Bogenlampen: Lichtbogen ev. mit Glocke und Reflektor) gerade noch sehen können; dagegen dürfen die Wände und die im Photometerraum befindlichen Gegenstände, sowie die Zubehörteile der Lampe (z. B. Glühlampensockel, Lampengehäuse) nicht sichtbar sein. Sieht man die letzteren noch, was bei einer großen Entfernung zwischen der letzten der oben genannten Blenden ($G_3 H_3$ in Fig. 152) und L_2 noch möglich ist, so hat man nahe vor L_2 noch eine Blende — in der Figur ist sie gestrichelt gezeichnet — zu setzen, welche das Licht von L_2 durchläßt, jedoch die Lampenzubehörteile abblendet.

Falls das Innere des Photometergehäuses nicht genügend geschwärzt ist, wird das nahezu parallel zur Ebene der Lichteinströmungsöffnung CD (also nahezu senkrecht zur Bankachse) in das Gehäuse fallende Licht von dem Boden, der Decke und der Seitenwand diffus auf den Photometerschirm reflektiert. Alsdann muß man vor CD in solcher Entfernung, daß sich das Photometer gerade noch umlegen läßt, noch eine Blende $G_0 H_0$ aufstellen, welche die eben genannten Strahlen zurückhält. Aus Vorsicht sollte man immer diese Blende benutzen.

Nach demselben Prinzip stellt man zwischen dem Photometerschirm und der anderen Lampe L_1 eine Reihe von Blenden und hinter dieser Lampe einen vollen Schirm auf. Alsdann kann bei dieser Stellung der Lichtquellen und des Photometers kein fremdes Licht in das letztere gelangen. Dies gilt auch noch für einen durch *diffuses Tageslicht* beleuchteten Photometerraum, falls man L_1 und L_2 durch passend aufgestellte volle Schirme vor diesem Lichte schützt; anderenfalls würde das letztere von den beiden Lampen ins Photometer reflektiert werden.

Wird nun bei der Messung z. B. das Photometer verschoben, so müßte man jedesmal sämtliche Blenden um den gleichen Betrag mitverschieben. Da dies zu umständlich ist, empfiehlt es sich, mindestens die vier dem Photometer zunächst liegenden Schirme ($G_0 H_0$, $G_1 H_1$ und die auf der anderen Seite von AB liegenden, nicht gezeichneten $G'_0 H'_0$, $G'_1 H'_1$) mit dem Photometer fest zu verbinden. Ferner tut

man gut, die übrigen Blenden etwas zusammenzurücken und auf jeder Seite des Photometers noch eine Blende einzuschieben. Hierbei ist ein größerer Abstand zwischen AB einerseits und L_1 und L_2 andererseits vorausgesetzt. Bei kleineren Abständen, z. B. wenn L_1 und L_2 beide auf der Photometerbank stehen, kommt man natürlich mit weniger Schirmen aus.

Anordnung in der Reichsanstalt. Wie aus Fig. 159, S. 325 ersichtlich ist, sind zu beiden Seiten des Photometers je drei Blenden mittels zweier Schienen fest mit demselben verbunden. Da sich die zu messende Lampe mittels eines Aufzuges in der Höhe verstellen läßt, konnte man der Bankachse ein für alle Male eine konstante Höhe, nämlich 1,55 m, über dem Fußboden geben. Deshalb sind die auf der Bank befindlichen Blenden nicht in der Höhe verstellbar. Das am rechten Ende der Bank befindliche Gebrauchsnormal ist in ein kleines, innen mit mattschwarzem Samt ausgekleidetes Häuschen — in der Figur ist es vor die Bank gesetzt — eingeschlossen, das nur auf der dem Photometer zugewandten Seite eine Öffnung von geeigneter Größe hat.

§ 140. Hilfsapparate für Messungen von elektrischen Lampen.

Auf die technischen Spannungs-, Stromstärke- und Wattmesser kann hier nicht eingegangen werden. Im folgenden sollen nur ein paar einfache Beispiele für die Anwendung von *Kompensationsmethoden* [1]) (Nullmethoden) angeführt werden, welche genaue und dabei doch verhältnismäßig einfache Messungen von Stromstärken und Spannungen, für Gleichstrom gestatten und sich deshalb auch zum Eichen bzw. Kontrollieren der entsprechenden technischen Apparate sowie zum Einregulieren von Normal- und Vergleichslampen eignen.

Hierzu bedarf man eines empfindlichen *Galvanometers* (z. B. nach Deprez-d'Arsonval, Wiedemann, Thomson) und eines *Normalelementes*, d. h. eines Elementes, welches eine bekannte, sich nicht mit der Zeit ändernde elektromotorische Kraft besitzt. Als Normalelemente kommen, da das Clarkelement [2]) (Quecksilber-Zink) zu sehr von der Temperatur abhängt, heute nur noch die beiden Formen des Westonelementes (Quecksilber-Cadmium) in Betracht. Das Element mit stets gesättigter $CdSO_4$-Lösung besitzt zwischen 10 und 30° bei der Temperatur t die elektromotorische Kraft

$$\mathfrak{f} = 1{,}0187 - 0{,}000035\,(t - 18) - 0{,}00000065\,(t - 18)^2 \text{ Volt.}$$

Das von der Weston-Gesellschaft hergestellte Element mit bei 4° gesättigter $CdSO_4$-Lösung ist bei verschiedenen Temperaturen praktisch als konstant anzusehen; es ist

$$\mathfrak{f} = 1{,}0190 \text{ Volt.}$$

[1]) Ausführlicheres hierüber sowie über die technischen Apparate siehe Kohlrausch, Praktische Physik 1905, im Kapitel „Elektrizität. Galvanismus.“

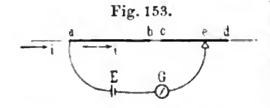
[2]) Zwischen 0 und 30° ist bei der Temperatur t die elektromotorische Kraft $\mathfrak{f} = 1{,}4292 - 0{,}00123\,(t - 18) - 0{,}000007\,(t - 18)^2$ Volt.

In der Reichsanstalt wird ausschließlich die erstere Form des Westonelementes benutzt, welche vor der anderen gewisse Vorzüge hat.

a) Stromstärkemessungen.

In der Leitung des zu messenden Stromes i (Fig. 153) befindet sich ein Normalwiderstand *ab* (0,5, 1,0 Ohm usw.) und ein kalibrierter Meßdraht *cd*, an welchem ein Schleifkontakt *e* anliegt. *ab* und *cd* sind aus Manganin (84 Cu, 12 Mn, 4 Ni) hergestellt, welches zwischen 15 und 20° von der Temperatur praktisch unabhängig ist und eine sehr geringe Thermokraft gegen Kupfer besitzt. Zur Vermeidung der Erwärmung durch den Strom wird *ab* in ein Petroleum- oder Ölbad gesetzt und der frei ausgespannte Draht *cd* möglichst stark genommen.

Fig. 153.



An *a* und *e* ist der Galvanometerzweig, bestehend aus dem Normalelement *E* und dem Galvanometer *G*, angelegt, und es wird *e* so lange verschoben, bis das Normalelement dem Strome, welcher ohne das Element im Galvanometerzweige entstehen würde, gerade entgegenwirkt, bis also das Galvanometer stromlos wird. Bezeichnet $\mathfrak{w}$ die Summe der Widerstände von *ab* und *ce*, so ist

$$i = \mathfrak{k}/\mathfrak{w} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Beweis. Nach einer der Kirchhoffschen Regeln ist in jedem geschlossenen Stromkreise die Summe der Produkte aus den einzelnen Widerständen und den zugehörigen Stromstärken gleich der Summe der in diesem Stromkreise vorhandenen elektromotorischen Kräfte. Nun ist im Galvanometerzweig die Stromstärke gleich Null, deshalb $i\mathfrak{w} = \mathfrak{k}$.

Beispiel 1. Es werde ein Westonelement der Weston-Gesellschaft benutzt; der Normalwiderstand *ab* sei gleich 1,0 Ohm; der Teil *ce* des Meßdrahtes sei 214,6 mm lang; sein Widerstand ergebe sich aus einer Tabelle durch Interpolation zu 0,2108 Ohm. Alsdann ist $i = 1{,}0190/1{,}2108 = 0{,}8416$ Ampere.

Soll auf eine bestimmte Stromstärke eingestellt werden, so stellt man den Laufkontakt auf die sich aus Gleichung 1) ergebende Stellung ein und reguliert im Hauptstrom mittels eines Regulierwiderstandes, bis der Strom im Galvanometerzweig verschwindet.

Beispiel 2. Eine *Normallampe* L_n soll auf die Stromstärke $i = 0{,}4782$ Ampere unter Benutzung des stets gesättigten Westonelementes einreguliert werden; die Temperatur des Elementes sei $t = 18^0$, so daß $\mathfrak{k} = 1{,}0187$ Volt ist. Demnach ist zu wählen $\mathfrak{w} = 1{,}0187/0{,}4782 = 2{,}1302$ Ohm. Für $t = 15^0$ oder 21^0 ist $\mathfrak{k}$ um 0,010 Proz. größer oder kleiner als für 18° zu nehmen. Für 13° und

23° würden diese Unterschiede 0,017 Proz. betragen. Würde man für $\mathfrak{w}$ stets den sich für 18° ergebenden Wert nehmen, so würde man i bei den angegebenen, von 18° abweichenden Temperaturen um 0,010 bzw. 0,017 Proz. unrichtig einstellen. Der letztere Fehler würde einen solchen von 0,14 Proz. in der Lichtstärke J_n zur Folge haben, wenn sich letztere, wie es bei mäßig beanspruchten Kohlenfadenglühlampen der Fall ist, prozentisch 8 mal so schnell wie die Stromstärke ändert.

Demnach kann man auch bei dieser Form des Westonelementes die Temperatur, wofern sie zwischen 13 und 23° schwankt, unberücksichtigt lassen und $\mathfrak{k} = 1{,}0187$ setzen, falls der hierdurch veranlaßte Fehler in J_n nicht größer als 0,14 Proz. werden soll.

Messung stärkerer Ströme. Der Meßdraht darf sich nicht erwärmen und ist deshalb nur bis zu einer gewissen Stromstärke brauchbar. Für größere Stromstärken schaltet man einen bekannten Widerstand $\mathfrak{w}_2$ parallel [1]) zu ad, dessen Widerstand $\mathfrak{w}_1$ sei (Fig. 154), ermittelt nach dem vorigen Verfahren die Stromstärke $\mathfrak{i}_1$ im Zweige ad und berechnet hieraus i mittels

Fig. 154.

$$\mathfrak{i} = \frac{\mathfrak{w}_1 + \mathfrak{w}_2}{\mathfrak{w}_2} \cdot \mathfrak{i}_1 \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

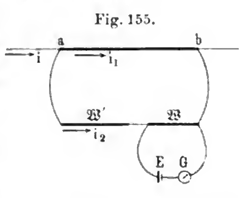
Beweis. i zweigt sich in $\mathfrak{i}_1$ und $\mathfrak{i}_2$, und es ist nach den Kirchhoffschen Regeln $\mathfrak{i} = \mathfrak{i}_1 + \mathfrak{i}_2$; $\mathfrak{i}_1 \mathfrak{w}_1 = \mathfrak{i}_2 \mathfrak{w}_2$, woraus sich obiger Ausdruck ergibt.

Dem Übelstande der Methode, daß man die Stromstärke nicht direkt abliest, kann durch Tabellen abgeholfen werden.

b) Spannungsmessungen. Methode 1 (Feussner [2]).

Parallel zu dem Widerstande ab, dessen Spannung $\mathfrak{v}$ gemessen werden soll (Fig. 155), werden die beiden ebenfalls aus Manganin hergestellten Widerstände $\mathfrak{W}$ und $\mathfrak{W}'$ geschaltet; an die Enden von $\mathfrak{W}$ wird der Galvanometerzweig angelegt. $\mathfrak{W}'$ ist ein konstanter Stöpselwiderstand, der entweder auf 10,000, oder 20,000... 100,000 Ohm gestöpselt werden kann;

Fig. 155.



[1]) Bekanntlich schaltet man auch bei den technischen Stromstärkemessern bei höheren Stromstärken zur Erweiterung des Meßbereiches Widerstände $\mathfrak{w}_2$ parallel zum Widerstande $\mathfrak{w}_1$ des Galvanometers. Gewöhnlich wählt man $\mathfrak{w}_2 = \mathfrak{w}_1/9$ und $\mathfrak{w}_1/99$. Alsdann geht nur i/10 bzw. i/100 durch das Galvanometer. War ohne Parallelschaltung z. B. 1° = 0,001 Ampere, so ist bei Parallelschaltung von $\mathfrak{w}_1/9$ bzw. $\mathfrak{w}_1/99$ 1° = 0,01 bzw. 0,1 Ampere.

[2]) Vgl. Lummer und Brodhun, Z. f. Instrk. 10, 121 (1890).

$\mathfrak{W}$ ist ein veränderlicher Stöpselwiderstand von 10000 Ohm in Stufen 0,1 bis 5000 Ohm. Bei Stromlosigkeit des Galvanometerzweiges ist

$$\mathfrak{v} = \left(1 + \frac{\mathfrak{W}'}{\mathfrak{W}}\right)\mathfrak{k} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Beweis. Der Strom i teilt sich in i_1 und i_2; entsprechend Gleichung 1) ist $i_2 = \mathfrak{k}/\mathfrak{W}$; andererseits ist auch $i_2 = \mathfrak{v}/(\mathfrak{W} + \mathfrak{W}')$, also

$$i_2 = \mathfrak{k}/\mathfrak{W} = \mathfrak{v}/(\mathfrak{W} + \mathfrak{W}'), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

woraus sich Gleichung 3) ergibt.

Beispiel 3. Es sei $\mathfrak{k} = 1{,}0187$ Volt; $\mathfrak{W}' = 100000$ Ohm; und es sei gestöpselt $\mathfrak{W} = 914{,}5$ Ohm; dann ist $\mathfrak{v} = 112{,}4$ Volt.

Beispiel 4. Ist gegeben $\mathfrak{W}' = 100000$ Ohm; $\mathfrak{v} = 120{,}0$ Volt, dann hat man zu stöpseln auf $\mathfrak{W} = \mathfrak{W}'\{\mathfrak{v}/\mathfrak{k} - 1\} = 856{,}2$ Ohm.

Zur Vermeidung von Rechnungen empfehlen sich Tabellen.

$\mathfrak{W}$ und $\mathfrak{W}'$ müssen während des ganzen Versuchs eingeschaltet bleiben [1]), weil sich sonst die Spannung von ab ändert. Wenn $\mathfrak{W}$ und $\mathfrak{W}'$ eingeschaltet sind, stimmt aber die Stromstärke i_1 im Widerstande ab nicht mit der Stromstärke i im Hauptstromkreise überein. Es ist nämlich nach Gleichung 4)

$$i_1 = i - i_2 = i - \mathfrak{v}/(\mathfrak{W} + \mathfrak{W}') \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

wo für das Korrektionsglied $\mathfrak{v}/(\mathfrak{W} + \mathfrak{W}')$, wenn $\mathfrak{W}$ gegen $\mathfrak{W}'$ hinreichend klein ist, auch $\mathfrak{v}/\mathfrak{W}'$ gesetzt werden kann.

Beispiel 5. Es sei gefunden $i = 0{,}5384$ Ampere, und es seien $\mathfrak{v} = 120$ Volt, $\mathfrak{W}' = 100000$ Ohm; dann ist $i_1 = 0{,}5372$ Ampere.

Methode 2 (Raps [2]).

Für *Spannungen über 1 Volt* (bis 1500 Volt) wird auch hier die in Fig. 155 skizzierte Anordnung benutzt, nur daß $\mathfrak{W}'$ ein veränderlicher Kurbelwiderstand von 0,1 bis 150000 Ohm und $\mathfrak{W}$ ein konstanter Stöpselwiderstand ist, in welchem entweder 10190 oder 1019 oder 101,9 Ohm gezogen werden. Bei Stromlosigkeit im Galvanometerzweige gilt wieder Gleichung 3), welche sich, da nach Gleichung 4) $i_2 = \mathfrak{k}/\mathfrak{W}$ ist, auch schreiben läßt

$$\mathfrak{v} = \mathfrak{k} + \mathfrak{W}' i_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Benutzt wird das Normalelement der Weston-Gesellschaft. Demnach ist für

$\mathfrak{W} =$	10190	1019	101,9 Ohm
$i_2 =$	0,0001	0,001	0,01 Ampere
$\mathfrak{v} = \mathfrak{k} +$	$0{,}0001\,\mathfrak{W}'$	$0{,}001\,\mathfrak{W}'$	$0{,}01\,\mathfrak{W}'$.

[1]) Auch die technischen Spannungsmesser müssen während des ganzen Versuchs eingeschaltet bleiben, und es muß dann die am Stromstärkemesser abgelesene Stromstärke um den Quotienten aus der gemessenen Spannung und dem Widerstand des Spannungsmessers vermindert werden. Damit diese Korrektion klein wird, muß der Spannungsmesser einen hohen Widerstand besitzen.

[2]) E. T. Z. 16, 507 (1895).

Beispiel 6. Es sei gestöpselt $\mathfrak{W} = 101{,}9$ (Empfindlichkeit 0,01); $\mathfrak{W}' = 10258$ Ohm. Alsdann ist $\mathfrak{v} = 1{,}019 + 102{,}58 = 103{,}60$ Volt. Wurde ferner gefunden

$$\mathfrak{i} = 0{,}7422 \text{ Ampere, so ist } \mathfrak{i}_1 = 0{,}7322 \text{ Ampere.}$$

Für *Spannungen unter 1 Volt* wird ein Hilfsstromkreis benutzt, welcher außer $\mathfrak{W}$ und $\mathfrak{W}'$ noch eine konstante Hilfsbatterie und fünf Kurbelwiderstände enthält und wieder auf eine Stromstärke von 0,0001 oder 0,001 oder 0,01 Ampere gebracht wird. Man liest dann die Spannung unmittelbar ab. Auch kann man nach dieser Methode *Stromstärken* messen, falls man für $a\,b$ einen Normalwiderstand wählt. Genaueres siehe Originalabhandlung.

Ein Vorgänger des Rapsschen Kompensationsapparates ist der von Feussner[1]. Das letztere Instrument wird, besonders in der ihm von Wolff[2]) gegebenen Form, ebenfalls vielfach angewendet.

§ 141. Hilfsapparate für die Prüfung von Lampen mit gasförmigem Brennstoff.

Die im gewöhnlichen Gebrauch befindlichen Experimentiergasmesser und Gasdruckmesser müssen als bekannt vorausgesetzt werden.

a) Kubizierapparat.

Eine perspektivische Ansicht des Apparates sieht man in Fig. 159, S. 325, wo er mit T bezeichnet ist. In einem mit Wasser gefüllten Kübel schwimmt eine Glocke. Die letztere trägt eine in Liter geteilte Skala, welche mittels einer am Kübel angebrachten Visiervorrichtung den Inhalt der Glocke abzulesen gestattet. Die von der Mitte der Glocke über eine Rolle geführte Kette trägt am anderen Ende ein veränderliches Gegengewicht. Mittels des letzteren läßt sich innerhalb gewisser Grenzen jeder Gasdruck im Apparate herstellen. Dieser Druck bleibt bei jeder Stellung der Glocke konstant. Die Stärke der Kette ist nämlich so gewählt, daß der durch das Eintauchen der Glocke ins Wasser entstehende Gewichtsverlust durch das Gewicht des hinzukommenden Teiles der Kette ausgeglichen wird.

Während des Versuches visiert man nach der Literteilung, beobachtet die Anzahl Sekunden t, während welcher eine ganze Anzahl n Liter verbraucht wird, und berechnet den stündlichen Verbrauch $\mathfrak{C}$ aus der Formel

$$\mathfrak{C} = 3600\, n / \mathfrak{T} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Beispiel. Es sei $n = 8$ Liter; $\mathfrak{T} = 233{,}8$ Sek. Dann ist $\mathfrak{C} = 123{,}2$ oder rund 123 Liter.

---

[1]) Z. f. Instrk. 10, 113 (1890).
[2]) Ebenda 21, 227 (1901).

Vorteilhaft ist es, sich eine Tabelle für 𝔈 anzufertigen.

Der Kubizierapparat wird in der Praxis meistens nur zur Kontrolle des Experimentiergasmessers, in der Reichsanstalt dagegen zu allen Gasmessungen benutzt.

b) Gasdruckregler.

Dieselben dienen dazu, das den Brennern zuzuführende Gas unabhängig von den Druckschwankungen in der Leitung auf gleicher Druckhöhe zu erhalten. Das Konstruktionsprinzip ist meistens das folgende: An einer schwach gespannten, gasdichten Membran oder einem leichten Metallplättchen (trockene Regler) oder einer in Wasser, Glycerin, Vaselinöl, Quecksilber schwimmenden Glocke (feuchte Regler) ist ein Ventil befestigt, das die Eintrittsöffnung des Reglers je nach dem Leitungsdruck mehr oder weniger schließt. Durch Belastung der Membran oder durch ein verschiebbares Laufgewicht usw. läßt sich innerhalb gewisser Grenzen ein beliebiger Gasdruck herstellen.

c) Junkerssches Kalorimeter[1]).

Prinzip. Von dem zu untersuchenden Gase wird ein Teil durch eine Gasuhr hindurch in das Kalorimeter geleitet, wo es unter konstanten Verhältnissen verbrennt. Die hierbei entwickelte Wärme wird vollständig von einem Wasserstrom aufgenommen, welcher das Kalorimeter in gleichbleibender Stärke durchfließt. Aus der Menge w des während einer beliebigen Zeit durchfließenden Wassers in Liter, der Temperaturerhöhung δ desselben und der während dieser Zeit zur Verbrennung gelangten Gasmenge s in cbm findet man den *Heizwert* c des Gases, d. h. die Verbrennungswärme von 1 cbm Gas, mittels der Gleichung

$$c = w\,\delta / s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Konstruktion. Das Kalorimeter besteht im wesentlichen aus einer Verbrennungskammer, in welcher das Gas mit gewöhnlichem Bunsenbrenner und natürlichem Zuge in freier atmosphärischer Luft verbrennt, und aus einem die Kammer umschließenden Röhrenkessel mit sehr vielen engen Röhren, in welchen die Verbrennungsgase ihre Wärme an das die Röhren umgebende Wasser abgeben und sich nahezu bis auf die Temperatur vor der Verbrennung abkühlen.

Zwei Überläufe erzeugen eine stets gleichbleibende Druckhöhe des den Apparat von unten nach oben durchströmenden Wassers, dessen Menge man mittels eines Hahnes regulieren kann; an der Ein- und

---

[1]) Z. f. Instrk. 15, 334 u. 408 (1895); D. R. P. 71731.

Ein kürzlich von Boys konstruiertes Kalorimeter — Nature 73, 354 (1906); Z. f. Instrk. 26, 260 (1906) — stimmt im Prinzip mit dem Junkersschen überein; es unterscheidet sich von diesem nur durch eine andere Anordnung der einzelnen Teile, z. B. dadurch, daß es zerlegbar ist und daß die beiden Thermometer in der gleichen Höhe angebracht sind.

Austrittsstelle des Wassers befindet sich je ein Thermometer. Um Wärmeabgabe nach außen zu vermeiden, ist das Kalorimeter mit einer doppelten Ummantelung versehen und vernickelt.

Ausführung der Messung. Man verbindet das Kalorimeter mit einer Wasserleitung und leitet das Gas durch einen Experimentiergasmesser. Nach dem Entzünden des Brenners tritt in wenigen Minuten der Gleichgewichtszustand ein.

Beispiel. Es sei die Temperatur des ein- bzw. ausströmenden Wassers gleich 32,51 bzw. 13,93°, demnach $\delta = 18{,}58^0$. Ferner sei $w = 1{,}622$ l; $s = 0{,}006$ cbm. Alsdann ist $c = 5023$ kg-Kal.

§ 142. Hilfsapparate für die Prüfung von Lampen mit flüssigem Brennstoff.

a) Bestimmung des spezifischen Gewichtes.

1. Pyknometer. Dasselbe ist ein Glasgefäß, welches ganz oder bis zu einer Marke gefüllt wird. Wiegt das Pyknometer leer p, mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt $p + m$, mit Wasser gefüllt $p + w$, so ist das spezifische Gewicht der Flüssigkeit $s = m/w$.

2. Kalibriertes Gefäß. Man füllt einen Meßzylinder bis zu einer beliebigen Marke und wiegt die Flüssigkeitsmenge. Ist m deren Gewicht in g und v deren Volumen in ccm, so ist $s = m/v$.

3. Skalenaräometer. Ein unten passend beschwertes, meist zylindrisches Hohlgefäß aus Glas trägt oben eine engere Glasröhre, die Spindel, welche mit einer Teilung versehen ist. Der Teilstrich, bis zu welchem das Aräometer in die zu untersuchende Flüssigkeit einsinkt, gibt unmittelbar das spezifische Gewicht an. Beim Ablesen hat man das Auge so zu halten, daß die Oberfläche der Flüssigkeit zur Linie verkürzt erscheint.

Alkoholometer. Es sind dies unten mit Thermometern versehene Aräometer, mit welchen man die *Alkoholstärke*, d. h. den Gehalt des Spiritus an absolutem Alkohol in Gewichtsprozenten, bestimmt. Man liest die scheinbare Alkoholstärke und die Temperatur des Spiritus ab und findet mittels einer amtlich herausgegebenen Tabelle [1]) die wahre Alkoholstärke.

b) Bestimmung des Verbrauches.

Die Bestimmung wird, ähnlich wie bei Carcellampe und Kerze, am praktischsten in der Weise ausgeführt, daß man die zu messende Lampe auf eine oberschalige Tafelwage, ev. auf eine Dezimalwage

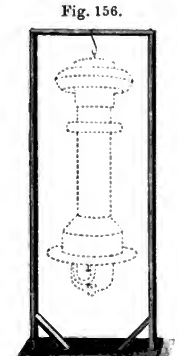
---

[1]) Alkohol-Ermittelungsordnung. Branntweinsteuer-Ausführungsbestimmungen. VII. Teil. Amtliche Ausgabe. Berlin, Julius Springer 1900.

Wegen Ableitung der Alkoholstärke aus dem spezifischen Gewicht siehe physikalisch-chemische Tabellen von Landolt und Börnstein, 3. Auflage. Berlin, Julius Springer 1905. S. 357 ff.

setzt und die Zeit bestimmt, in welcher eine bestimmte Flüssigkeitsmenge verbraucht wird. Eine Stehlampe wird direkt auf die Wage gesetzt; eine Hängelampe wird an einem geeigneten Stativ, z. B. dem in Fig. 156 angegebenen, aufgehängt und mit diesem zugleich gewogen.

Fig. 156.



§ 143. Feuchtigkeitsmesser.

Bei genauen Messungen mit der Hefnerlampe und den Pentanlampen muß man den Feuchtigkeitsgehalt der Luft in Rechnung ziehen (vgl. S. 118, 125 und 128).

Wenn man von den hygroskopischen Apparaten, z. B. dem vielfach angewandten Haarhygrometer von Saussure, als zu ungenau absieht, kommen hierbei die folgenden Feuchtigkeitsmesser in Betracht.

a) Taupunkt- (oder Kondensations-)Hygrometer.

Man kühlt eine Glaskugel (Daniell) oder ein ganz dünnes Platingefäß (Regnault) ab, indem man den im Innern befindlichen Äther in geeigneter Weise zur Verdunstung bringt, und bestimmt diejenigen Temperaturen t und t′, bei welchen die Tauausscheidung auf einem die Kugel oder das Gefäß umgebenden goldenen Ringe beginnt oder verschwindet, bei welchen also die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Die Temperatur $0{,}5\,(t + t')$ wird dann als Taupunkt angesehen. Die bei dieser Temperatur t aus der Tabelle III, Anhang, entnommene Spannkraft ist die in der Atmosphäre vorhandene Spannung e.

b) Augusts Psychrometer.

Es besteht aus zwei sehr empfindlichen Thermometern A und B, von denen A trocken bleibt und B feucht erhalten wird. Infolge der Verdunstung steht B immer niedriger als A. Haben e, t, t′ und b dieselbe Bedeutung wie auf S. 116 und 117, so ist

für t′ über Null oder unter Null

$$e = e' - a \cdot b\,(t - t') \quad „ \quad = e' - a' \cdot b\,(t - t').$$

Die Koeffizienten a und a' hängen vom Bewegungszustande der Luft ab. Bei mäßig bewegter Luft im Freien ist nach Kohlrausch [1])

$$a = 0{,}00080;\ a' = 0{,}00069.$$

In kleinen geschlossenen Zimmern sind a und a' bis zu 50 Proz. größer.

Assmannsches Aspirationspsychrometer [2]). Die Thermometerkugeln sind mit einem doppelten Metallschutzrohr umgeben,

[1]) Praktische Physik 1905, S. 191.

[2]) Z. f. Instrk. 12, 1 (1892).

durch welches mittels eines im oberen Teile des Apparates befindlichen Uhrwerk-Ventilators ein Luftstrom mit konstanter Geschwindigkeit gesaugt wird. Zum Schutze gegen Strahlung sind die Schutzrohre vernickelt und poliert. Der Apparat läßt sich bequem handhaben und gibt genaue Werte. e wird mittels der Sprungschen Formel 2) S. 117 gefunden.

§ 144. Photometerräume.

a) Ältere Photometerräume.

Eines der ersten photometrischen Laboratorien war 1882 auf der elektrotechnischen Ausstellung in München eingerichtet worden. Dasselbe enthielt (Fig. 157) die beiden 6 bzw. 12 m langen Photometerbänke *AB* und *BC* mit den Photometern *D* und *E*. Mittels *D* wurde zunächst die 45 mm hohe englische Kerze bei *b* mit dem Giroudschen Einlochbrenner (S. 110) bei *a*, sodann dieser mit dem bei *b* an Stelle der Kerze aufgestellten Argandbrenner von 12 Kerzen, hierauf der letztere mit dem Siemensschen Regenerativbrenner *c* von 120 Kerzen und endlich dieser mittels *E* mit der Bogenlampe *d* verglichen.

Fig. 157.

Durch die verschiedenen Zwischenlichtquellen wurde erreicht: 1. daß sich immer verhältnismäßig große Abstände zwischen dem Photometer und den jeweilig zu vergleichenden Lichtquellen ergaben (vgl. Anhang 1, Aufgabe 2); 2. daß der Farbenunterschied bei den einzelnen Vergleichungen verhältnismäßig gering war, während die direkte Vergleichung der Bogenlampe mit der Kerze sehr schwer ist (S. 229). Da aber diese Anordnung sehr zeitraubend war und wegen der Schwankungen des Argandbrenners zu ungenauen Ergebnissen führte, wurde später die Kerze und der Argandbrenner fortgelassen, der Einlochbrenner von *a* nach *b* an die Stelle des Argandbrenners gebracht und nun gleichzeitig der Siemensbrenner *c* mit dem Einlochbrenner auf der Bank *AB* und mit der Bogenlampe *d* auf der Bank *BC* verglichen. Elektrische Glühlampen wurden an Stelle des Siemensbrenners *c* gesetzt und direkt mit dem Giroudbrenner verglichen. Zu Anfang der Messungen und nach längeren Zeiträumen wurden Kerze und Giroudbrenner verglichen.

Der Photometerraum auf der Ausstellung in Antwerpen 1885 war ähnlich eingerichtet, nur daß zwischen den beiden Photometerbänken eine Wand aus schwarzem Tuche zum Abblenden von fremdem Licht aufgestellt war. Statt des Giroudbrenners wurde dort die Carcellampe benutzt.

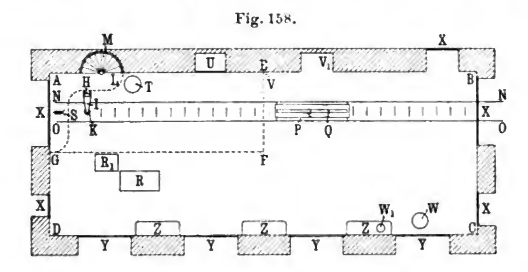
b) Das Photometerzimmer der Reichsanstalt.

Das Zimmer besitzt so große Abmessungen, daß sich sehr verschieden starke Lichtquellen mittels ein und derselben Normallampe

ohne besondere Schwächungsmittel (rotierende Sektoren, Polarisatoren, Rauchgläser usw.) unmittelbar hintereinander photometrieren lassen; bei einem Versuche wurden so Lichtstärken von 34000 und 50 HK gemessen.

Fig. 158 zeigt den Grundriß *ABCD* des 15 m langen und 6 m breiten Photometerzimmers; Fig. 159 gibt eine perspektivische Ansicht

Fig. 158.



der wichtigsten Teile desselben. Bei *AEFG* ist die Decke durchbrochen, und unter Benutzung des zum nächsthöheren Stockwerke gehörigen Raumes ist hier ein 8 m langer und 3 m breiter Schacht aufgeführt. Hier ist das Zimmer 8,6, sonst nur 4,3 m hoch. Im Schachte befindet sich ein *Aufzug:* eine vertikale |—|-Säule *H* aus Eisen, an welcher sich mittels acht Rollen ein horizontaler, an einem Drahtseil ohne Ende befestigter und mit Gegengewichten versehener Wagen *J* längs einer Teilung auf und abbewegen und an jeder Stelle festklemmen läßt (vgl. auch Fig. 94b, S. 228). Der Wagen *J* besitzt ein vertikales Rohr *K*, welches um seine Achse drehbar und durch Zahn und Trieb in der Höhe verstellbar ist. Dieses Rohr trägt eine am Rande mit 40 Löchern versehene Teilscheibe. Mittels einer feststehenden Einschlagfeder kann man das Rohr *K*, ohne auf die Teilung zu sehen, nacheinander um je 9° drehen. *K* besitzt oben und unten je einen Gewindeansatz. Auf diese lassen sich geeignete Zwischenstücke (Glühlampenfassungen, Teller, Haken usw.) zur Aufnahme der zu messenden Lampe aufschrauben. Wie bereits S. 311 bemerkt wurde, wird die letztere in den allermeisten Fällen so aufgestellt. Man kann dann die Lampenmitte leicht in die Bankachse bringen; die gröbere Einstellung geschieht hierbei durch Verschieben des ganzen Wagens, die feinere, indem man nur das Rohr *K* mittels des Zahntriebes in der Höhe verstellt. Ferner kann die zu messende Lampe in jede gewünschte Höhe gebracht und so unter verschiedenen Ausstrahlungswinkeln gegen die Vertikale gemessen werden. Hierbei wird die Lampe von den vier im Schachte übereinander liegenden Balkons *AGL* aus bedient, zu denen die Treppe *M* führt.

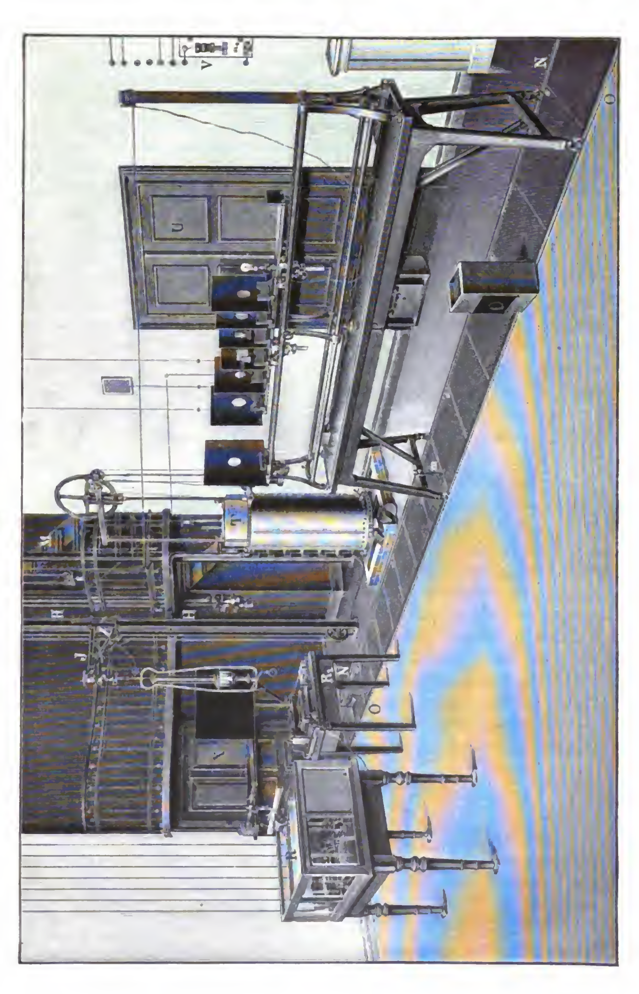


Fig. 159.

In den Fußboden sind durch das ganze Photometerzimmer und das an dasselbe bei B anstoßende Zimmer die beiden Schienen NN und OO symmetrisch zur Achse des Rohres K eingelegt. Zwischen den Schienen befinden sich auf dem Fußboden die Teilstriche 0, 0,5, 1, 1,5 usw. in Abständen von je $^1/_2$ m. Auf den Schienen läuft mittels vier Rollen der Tisch P, welcher die Photometerbank Q trägt. Der Tisch ist unten mit einem zurückdrehbaren Index m versehen, welcher über der Teilung am Fußboden hinweggleitet. Indem man den Tisch auf den Schienen und das Photometer auf der Bank verschiebt, kann also schnell jede beliebige Entfernung r zwischen dem Photometerschirm und der zu messenden Lampe meßbar eingestellt werden.

Der Schacht sowie die Teile AE und AG der Wände AB und AD sind mattschwarz gestrichen. Die übrigen Teile der Wände sind entgegen dem bisher üblichen Brauch weiß, da sich durch Schirme alles fremde Licht vom Photometerschirm abhalten läßt. An der Straßenwand CD des Zimmers befinden sich vier Fenster Y, welche mittels schwarzer Rolljalousien lichtdicht abgeschlossen werden können. Obgleich man selbst bei Tageslicht bei genügender Vorsicht (S. 314) richtig messen kann, sind diese Verdunkelungsvorrichtungen doch vorgesehen, damit das Auge nicht unnötig ermüdet werde.

Zwischen den Fenstern sind die Konsolen Z angebracht, auf welchen Apparate usw. aufgestellt werden. X sind fünf Türen. U ist ein Schrank in der Wand AB. Durch eine Reihe mittels Klappen verschließbarer Luftschächte ist für gute Ventilation gesorgt.

R und R_1 sind zwei Meßtische mit im ganzen drei Kompensationsvorrichtungen (S. 316 ff.), nämlich zwei Stromstärkemessern für das Gebrauchsnormal und die zu messende Lampe und einem Spannungsmesser für die zu messende Lampe. In der Nähe der Wand AD befindet sich bei S auf einem Konsol der rotierende Spiegelapparat von Brodhun (Fig. 163, S. 332). T ist ein Kubizierapparat (S. 319). V und V_1 sind Schaltbretter für die Experimentierbatterien. An der Wand CD ist in der Nähe der Ecke C der Preßgasbehälter W für das Abbrennen von Glühstrümpfen (§ 158) und das Junkerssche Kalorimeter W_1 (S. 320) aufgestellt.

c) Photometerraum nach Angaben der Deutschen Lichtmeßkommission.

Der Photometerraum soll nach den Vorschriften der Lichtmeßkommission[1]) des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern mindestens 4 m lang, 2,6 m breit und 3 m hoch sein und in seiner Mitte einen 2,8 m langen, 0,75 m breiten und 0,80 m hohen Tisch enthalten, auf dem sich vorn die Photometerbank (Fig. 151, S. 311), hinten der Gasmesser und der Gasdruckregulator befinden. Die

[1]) J. f. G. u. W. 41, 829 (1898).

Bankachse soll 0,75 m über dem Tisch, also 1,55 m über dem Fußboden liegen.

Es ist zweckmäßig, ein Fenster anzubringen, damit man Änderungen an Rohrleitungen und dergleichen bei Tageslicht vornehmen kann. Das Fenster muß mittels eines Ladens, Rolladens, schwarzen Tuches usw. licht- und winddicht verschlossen werden können.

Zwei Kanäle von wenigstens 15 qcm Durchmesser, von denen der eine am Boden, der andere an der Decke ins Freie führt, sollen zur Lüftung dienen. Beide sind durch Drahtsiebe zu verschließen und mit Fallklappen zu versehen, welche während des Photometrierens geschlossen werden.

Photometerraum und Fußboden sollen dunkel, der Tisch vollständig mattschwarz gestrichen sein. Die Temperatur soll zwischen 12,5 und 22,5° liegen.

Zehntes Kapitel.

Lichtverteilung und spezifischer Verbrauch der gebräuchlichsten Lichtquellen.

§ 145. Terminologie.

Wegen der Bedeutung von $J(\vartheta)$, J_m, J_s, $J_{s,u}$, $J_{s,o}$ siehe § 124. Ferner soll bedeuten:

J_{ma} die maximale Lichtstärke der Lampe;

$\mathfrak{C}$ bei elektrischen Lampen den Gesamtverbrauch in Watt, bei den anderen Lampen den stündlichen Gesamtverbrauch an Leuchtmaterial (z. B. für Gas in Liter, für Petroleum in Gramm),

und es werde zur Abkürzung gesetzt

$$\mathfrak{C}_m = \frac{\mathfrak{C}}{J_m};\ \mathfrak{C}_s = \frac{\mathfrak{C}}{J_s} \text{ usw.}$$

Mithin bedeutet $\mathfrak{C}_m$ bzw. $\mathfrak{C}_s$ usw. den Verbrauch auf eine Kerze[1]) (Hefnerkerze oder bougie décimale oder candle) mittlere Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse bzw. mittlere räumliche Lichtstärke usw. Diese Größen werden von den meisten Autoren als *spezifischer Verbrauch* bezeichnet. Wir wollen uns dieser Bezeichnung anschließen.

[1]) Wenn nicht entgegenstehendes gesagt wird, werde hier unter Kerze immer Hefnerkerze verstanden.

Für elektrische Lampen ist der spezifische Verbrauch also identisch mit der von uns auf S. 98 definierten Ökonomie.

Falls im folgenden eine entgegenstehende Angabe nicht gemacht wird, sollen sich die mitgeteilten Zahlen für $\mathfrak{C}_m$, J_m usw. auf *nackte* Lampen, d. h. auf Lampen beziehen, welche weder mit einer Glocke, noch mit einem Reflektor versehen, noch in einer Laterne eingeschlossen sind.

§ 146. Elektrische Kohlenfaden-Glühlampen.

a) Lichtverteilung.

Im nachstehenden sollen die Ergebnisse von Versuchen mitgeteilt werden, die Verfasser[1]) an den folgenden vier Lampentypen hauptsächlich zu dem Zwecke angestellt hat, Methoden zur Photometrierung derselben anzugeben. Die Typen sind in Fig. 160 zusammengestellt, wo die punktierten Linien die Lampenachse (S. 268) bezeichnen. Es besaß:

Fig. 160.

1. 2a. 2b. 2c. 2d. 2e. 3a 3b. 3c. 3d 4.

Type 1 einen geraden in der Lampenachse liegenden Kohlenfaden;

Type 2a bis d einen hufeisenförmigen oder langgestreckten, bügelförmigen Kohlenfaden, oder zwei langgestreckte, bügelförmige Kohlenfäden, welche in derselben oder in parallelen Ebenen liegen; Type 2e einen kurzschenkeligen Bügel (Bernsteinlampen);

Type 3a bis 3d eine einfach oder doppelt oder dreifach kreisförmig geschlungene Schleife oder zwei einfache Schleifen;

Type 4 einen wellenförmigen Kohlenfaden.

Die Lampen 2d* und 3a* waren mit halbdurchscheinenden Mattglashüllen[2]) versehen; alle übrigen Lampen besaßen Hüllen aus Klarglas, deren Gestalt zwischen einer nahezu zylinderförmigen (Type 1) und kugelförmigen (Type 4) variierte. Die Mattglaslampen zeigten nahezu dieselbe Lichtverteilung wie die Klarglaslampen.

1. Lichtverteilung in der Ebene senkrecht zur Lampenachse.

Hierbei spielen folgende vier durch die Lampenmitte gehenden und auf der Lampenachse senkrecht stehenden Richtungenpaare eine hervorragende Rolle:

---

[1]) Z. f. Instrk. 19, 193 (1899).

[2]) Der durch Mattierung veranlaßte Lichtverlust (vgl. S. 344) beträgt je nach der Stärke der Mattierung 2 bis über 10 Proz.; er wird gefunden, indem man Lampen mit Klarglashülle zuerst mit dieser, sodann nach Mattierung derselben auf räumliche Lichtstärke untersucht.

Richtungen I und I': bei Type 2 diejenigen Richtungen, welche in der Ebene des Kohlenbügels liegen oder ihr parallel sind; bei Type 3 diejenigen, welche den Tangenten im Scheitel der äußeren Schleifenwindungen parallel sind; bei Type 4 diejenigen, welche den geradlinigen Stücken des wellenförmigen Teiles parallel sind.

Richtungen II und II': die auf I und I' senkrechten Richtungen;

Richtungen III und III': die Verbindungslinien der Enden des Kohlenfadens oder die dazu parallelen Richtungen;

Richtungen IV und IV': die auf III und III' senkrechten Richtungen.

Stellt man die Lampen 3a aufrecht so auf, daß II mit der Bankachse zusammenfällt, so erscheinen, vom Photometer aus gesehen, die Schleifenwindungen, wie Fig. 161a zeigt, als zwei sich nahezu deckende Kreise. Sieht man von oben auf die Lampen, so erscheint der Faden, wie in Fig. 161b angegeben, und zwar steht die Tangente in A auf der Bankachse senkrecht. Analog verhält es sich mit den Lampen 3b, c und d.

Fig. 161.

Kurven der Lichtverteilung. Es wurden unter Benutzung einer Teilscheibe und einer Einschlagfeder (siehe Fig. 94b, S. 228, ferner S. 324) in 40 um je 9° voneinander entfernten Richtungen, und sobald sich stärkere, durch die Glashülle veranlaßte Reflexe zeigten, auch noch in der Nähe dieser Reflexe Messungen ausgeführt und die beobachteten Lichtstärken sodann in Polarkoordi-

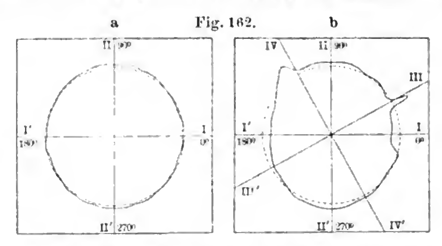


Fig. 162.

naten aufgetragen. Als Beispiele mögen die Kurven der Fig. 162 *a* und *b* dienen. Die Radien der gestrichelten Kreise sind gleich den mittleren Lichtstärken J_m senkrecht zur Lampenachse. Kurve *a* (Type 2a) ist nahezu kreisförmig, während *b* (Type 3a) sich mehr von der Kreisform entfernt und in der Nähe von III und IV je einen Reflex zeigt.

Die Reflexe erfolgten im allgemeinen sehr unregelmäßig; am häufigsten traten sie bei Type 2 in Richtung I und bei Type 3 in

Richtung III auf. Bei Type 4 wurden, wohl zufällig, nur geringe Reflexe beobachtet. In Richtung II zeigte keine Lampe Reflexe, und es ist wohl anzunehmen, daß bei den Lampen 2 und 3a mit den bisher gebräuchlichen Glashüllen in dieser Richtung Reflexe selten vorkommen; eher dürften sie vielleicht bei breiteren Lampen 3c und mehr ausgebauchten Lampen 4 zu erwarten sein.

Lichtstärkenschwankungen. Das Verhältnis zwischen dem Maximum (nach Ausschluß der Reflexe) und dem Minimum betrug im Mittel für

2a bis c	2d	2d*	2e	3a	3a*	3b bis d	4
1,07	1,17	1,06	1,72	1,19	1,14	1,29	etwa 2,8.

Normallampen. Dieselben dienen in erster Linie zur Festlegung einer bestimmten Lichtstärke in einer gegebenen Ausstrahlungsrichtung. Hierzu sind, wie bereits S. 154 bemerkt wurde, Lampen mit hufeisen- oder bügelförmigem Kohlenfaden (Typen 2a und b) am geeignetsten; jedoch sind auch noch Lampen mit einfach schleifenförmigem Faden (Type 3a) verwendbar. Die günstigste Ausstrahlungsrichtung bei diesen Typen ist die Richtung II, oder eine ihr nahe Richtung [1]), weil sich die Lichtstärke in der Nähe von II wenig mit der Ausstrahlungsrichtung ändert.

Außerdem sind auch noch Normallampen zur Festlegung einer bestimmten mittleren Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse (für den rotierenden Spiegelapparat S. 332, für die Winkelspiegelmethode, § 156), sowie einer bestimmten mittleren räumlichen Lichtstärke (§ 134 bis 137) im Gebrauch.

Bestimmung der mittleren Lichtstärke J_m senkrecht zur Lampenachse. Dieselbe wurde als das Mittel aus den in den 40 verschiedenen Richtungen gefundenen Werten und, wenn sich in Ausnahmefällen größere Reflexe außerhalb dieser Richtungen zeigten, unter Berücksichtigung derselben berechnet.

Ferner wurde untersucht, ob sich die Lichtstärke J_m schon durch Messungen in einer einzigen Richtung oder einer beschränkteren Zahl von Richtungen genügend genau bestimmen ließe. Dabei ergab sich, daß für Messungen in einer Richtung nur II in Frage kommen kann, und zwar wurde der Faktor, mit welchem man die Lichtstärke in dieser

[1]) Zuweilen wird für die genannten Typen 2 die Richtung I, für die Type 3a die Richtung III oder IV zugrunde gelegt. Diese Richtungen sind aber nicht immer zur Festlegung einer Lichtstärke geeignet. Als Beispiel möge die in Fig. 162b gekennzeichnete Lampe dienen, welche der Reichsanstalt zur Prüfung eingereicht war und in den Richtungen III und IV zu photometrieren war. Infolge der Reflexe in der Nähe dieser Richtungen ergaben sich Lichtstärkenwerte, die zwischen 15,1 und 19,3 HK bzw. 16,5 und 17,5 HK schwankten, als man die Lampe mehrfach aus der Stellung, in welcher sich III bzw. IV in der Bankachse befand, herausdrehte und sodann mit der Hand nach Möglichkeit wieder in dieselbe einstellte.

Richtung multiplizieren muß, um J_m zu erhalten, bis auf $\pm$ 2,0 Proz. gefunden für die

Type	2a bis 2d	2e	3a u. 3d	3b u. 3c	4
zu	0,99	0,88	0,94	0,90	0,73.

Von Messungen in zwei zueinander senkrechten Richtungen ist, mit Rücksicht auf die zu befürchtenden Reflexe, abzusehen. Dagegen erhält man hinreichend genaue Werte, wenn man das Mittel aus den Lichtstärken in drei um je 120° entfernten Richtungen nimmt; die Genauigkeit wird natürlich um so größer, in je mehr Richtungen man mißt. Nachstehende Tabelle 1, in welcher

f den mittleren prozentuellen Fehler,

f_1 die größten prozentuellen Fehler nach oben oder unten

bezeichnet, enthält das Ergebnis dieser Untersuchung.

Tabelle 1.

Anzahl der Richtungen	Bezeichnung einer der Richtungen	Type 2a—2d			Type 3a			Type 3b, 3c, 3d			Type 4		
		f	f_1		f	f_1		f	f_1		f	f_1	
		$\pm$	+	—	$\pm$	+	—	$\pm$	+	—	$\pm$	+	—
3	Richtung II	1,0	2	3	2,0	7	3	1,5	4	2	1,0	2	1
3	„ IV	—	—	—	1,9	6	3	—	—	—	—	—	—
3	Beliebig . .	2,1	13	3	2,4	17	5	1,7	4	3	1,1	3	3
5	„ . .	1,5	7	3	1,6	10	3	1,3	4	2	0,6	1	1
10	„ . .	0,9	3	1	1,0	5	2	0,8	1	1	0,5	1	1
20	„ . .	0,4	1	1	0,5	2,1	1,4	0,4	0,5	0,5	0,0	0,2	0,2

Die Lampen der Type 4, welche nur geringe Reflexe aufwiesen, geben also, trotz der bedeutenden Schwankungen zwischen Maximum und Minimum, die kleinsten Fehler. Die Lampen 3a ergeben infolge größerer Reflexe auch größere Fehler als die übrigen Typen 3.

Einen genauen Wert von J_m erhält man durch *eine* Messung mittels des rotierenden Spiegelapparates von Brodhun (Fig. 163). Die zu messende Lampe L steht fest; ihre Achse ist horizontal und liegt in der Verlängerung der Bankachse. Die beiden Spiegel S_1 und S_2 sind gegen die Lampenachse um 45° geneigt und werden um die letztere mittels des Elektromotors E in so schnelle Rotation (etwa 4mal in der Sekunde) versetzt, daß im Photometer ein kontinuierlicher Eindruck entsteht. Durch den mit zwei Öffnungen versehenen mitrotierenden Schirm B werden die direkten Strahlen abgeblendet.

Man mißt hier die Summe der mittleren Lichtstärken der rotierenden Spiegelbilder von L, also

$$J'_m = (R_1 + R_2) J_m, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

wenn R_1 bzw. R_2 das Reflexionsvermögen des Spiegels S_1 bzw. S_2 ist, und hieraus findet man, wenn man die Konstante

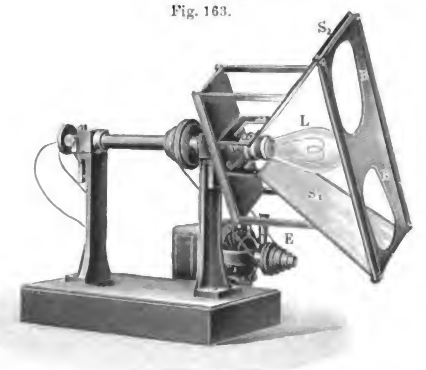
$$\frac{1}{R_1 + R_2} = C \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

setzt,



$$J_m = C J'_m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Fig. 163.



Ergibt eine Normallampe von der mittleren Lichtstärke $J_{n,m}$ den Wert $J'_{n,m}$, so ist

$$C = J_{n,m} / J'_{n,m} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Häufig bestimmt man J_m nach dem Vorgange von Crova [1]) (vgl. Sharp, Fig. 140a, S. 294 und Matthiews, S. 306), indem man die aufrecht stehende Lampe um ihre Achse rotieren läßt. Diese Methode ist nicht einwandfrei. Denn bei der gewöhnlichen Helligkeit im Photometer muß sich die Lampe etwa 4mal in der Sekunde drehen, damit man einen stetigen Gesichtseindruck erhält; bei einer so großen Geschwindigkeit kann der Faden aber infolge der Zentrifugalkraft eine Deformation erleiden. Bei geringerer Helligkeit kann man das Flimmern allerdings schon bei kleinerer Umdrehungsgeschwindigkeit zum Verschwinden bringen; allein dann ist die Empfindlichkeit der Einstellung nur gering.

Über die Bestimmung von J_m nach der Winkelspiegelmethode siehe § 156.

2. Räumliche Lichtverteilung.

Durch Messungen in 20 um je 18^0 voneinander entfernten Meridianebenen (S. 268) wurden die mittleren Lichtstärken $J(\vartheta)$ unter den

[1]) C. r. des travaux du congrès des électriciens de 1889, p. 208.

Poldistanzen: $\vartheta = 0$ (Lampenspitze), 18, 36 ... 180° (Sockel) bestimmt. Nachstehende Tabelle 2 enthält die aus einer größeren Anzahl von Lampen gefundenen Mittelwerte für $J(\vartheta)/J_m$ und J_s/J_m.

Tabelle 2 [1]).

	$\frac{J(\vartheta)}{J_m}$ für $\vartheta =$											$\frac{J}{J_m}$
	180°	162°	144°	126°	108°	90°	72°	54°	36°	18°	0°	
1	—	0,212	0,552	0,795	0,954	1,000	0,956	0,828	0,574	0,212	0	0,77
2a	—	0,278	0,599	0,802	0,945	1,000	0,974	0,857	0,689	0,512	0,410	0,81
2b	—	0,192	0,522	0,786	0,944	1,000	0,952	0,818	0,598	0,326	0,156	0,77
2c	—	0,166	0,443	0,689	0,886	1,000	1,004	0,896	0,734	0,594	0,673	0,79
2d	—	0,192	0,523	0,786	0,935	1,000	0,956	0,823	0,632	0,370	0,085	0,78
2d*	—	0,284	0,524	0,754	0,923	1,000	0,941	0,774	0,551	0,314	0,216	0,75
2e	—	—	0,713	0,911	0,974	1,000	0,990	0,930	0,898	0,715	0,468	0,87
3a	—	0,303	0,669	0,826	0,949	1,000	0,988	0,905	0,773	0,687	0,627	0,85
3b	—	0,406	0,729	0,884	0,959	1,000	0,984	0,922	0,830	0,764	0,721	0,88
3c	—	0,434	0,843	0,951	0,976	1,000	0,990	0,924	0,822	0,709	0,707	0,90
3d	—	0,362	0,662	0,846	0,962	1,000	0,961	0,855	0,716	0,588	0,522	0,83
3a*	—	0,346	0,629	0,846	0,968	1,000	0,952	0,842	0,746	0,680	0,650	0,84
4	—	0,669	1,021	1,081	1,027	1,000	1,038	1,119	1,213	1,233	1,295	1,05

Fig. 164 zeigt die aus der Tabelle abgeleitete räumliche Lichtverteilung der Lampen 2a (Kurve *a*) und 3a (Kurve *b*).

Fig. 164.

Aus der ersten Horizontalreihe der Tabelle geht, wie schon S. 81 bemerkt wurde, hervor, daß die Lampe mit geradem Kohlenfaden zwischen den Poldistanzen $\vartheta = 90$ und 36° (bzw. 144°) nahezu das *cos* ε-Gesetz befolgt; denn es ist $\varepsilon = 90 - \vartheta$ (bzw. $\vartheta - 90°$).

Die Größe J_s/J_m, also der *Reduktionsfaktor* zur Umrechnung der mittleren Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse J_m in mittlere räumliche Lichtstärke J_s schwankt demnach zwischen 0,75 (Type 2d*) und 1,05 (Type 4), d. h. bei gleichem J_m besitzen die Lampen 4 ein um etwa 40 Proz. größeres

[1]) Die Zahlen für die fünf Typen 3 beziehen sich, wie bereits gesagt wurde, auf Fäden, welche wie in Fig. 161a kreisförmig geschlungen waren. Fäden, welche langgestreckt elliptisch geschlungen sind, ergeben für die Zahlen der letzten Vertikalspalte der Tabelle um ein paar Einheiten der zweiten Dezimale kleinere Werte.

J_s als die Lampen 2. Die Lampen 4 werden also im Vergleich zu den übrigen Typen unverhältnismäßig ungünstig behandelt, wenn man J_m als Maßstab für die Beurteilung zugrunde legt. Sobald es sich um den Vergleich verschiedenartiger Lampen handelt, darf man nur J_s in Rechnung ziehen. (Vgl. S. 284).

Bestimmung von J_s für die Zwecke der Praxis. Aus den Untersuchungen über die Lichtverteilung lassen sich die folgenden Methoden ableiten.

Methode 1. Man bestimmt J_m und berechnet daraus J_s mittels des Umrechnungsfaktors J_s/J_m. Der dabei begangene Fehler kann, wenn J_m mittels der Winkelspiegelmethode ermittelt wird, bis zu 10 Proz. betragen.

Methode 2. Man bestimmt bei den Typen 2 und 3 die mittleren Lichtstärken unter den Poldistanzen 51,8 und 128,2° und nimmt das Mittel. Dieses Verfahren ist auch noch auf Type 4 anwendbar, falls man durch Anbringung eines in geeigneter Weise gebogenen Zwischenstückes die Lampe um eine in die Richtung I fallende Achse drehbar macht, also I zur Lampenachse macht. Bei den Lampen 2b und 3a erhält man so bis auf etwa $\pm 0{,}2$ bzw. $\pm 1{,}2$ Proz. richtige Werte, während bei den anderen Lampen Korrektionen bis zu etwa 4 Proz. anzubringen sind. Mittels zweier rotierender Spiegel lassen sich die Messungen schnell ausführen.

Methode 3. Man bestimmt die Lichtstärke J'' in Richtung II und benutzt als Reduktionsfaktor für

Type	2	3	4
$J_s/J'' =$	0,78	0,80	0,77.

Der Maximalfehler ergab sich für die Lampen 3a und betrug 7 Proz. Mit einer für die Zwecke der Praxis ausreichenden Genauigkeit kann man für alle Typen den gemeinsamen Reduktionsfaktor benutzen

$$\frac{J_s}{J''} = \frac{\pi}{4} (= 0{,}785) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Begründung von Gleichung 5. Es werde angenommen, daß der Kohlenfaden einen kreisförmigen Querschnitt habe, überall die gleiche Dicke und die gleiche Flächenhelle besitze und das $\cos\varepsilon$-Gesetz befolge. Ferner soll angenommen werden, daß das vom Kohlenfaden ausgehende Licht durch die Glashülle keine Änderung der Lichtverteilung erfahre und durch den Sockel nicht abgeblendet werde. Alsdann läßt sich der Glühfaden durch eine mathematische Linie ersetzen, welche mit seiner Mittellinie zusammenfällt und mit einer gewissen Linienhelle λ (Lichtstärke der Geraden von der Länge 1 in zur Geraden senkrechter Richtung) leuchtet. Von der ganzen Mittellinie wollen wir zunächst ein Element dl betrachten. Seine Lichtstärke in zu dl senkrechter Richtung ist dann gleich $\lambda\,dl$, demnach seine Lichtstärke unter einem Ausstrahlungswinkel ϑ gegen dl

$$dJ(\vartheta) = \lambda \sin\vartheta \, dl,$$

so daß gemäß Gleichung 1a) auf S. 274 seine mittlere räumliche Lichtstärke

$$dJ_s = \frac{1}{2}\lambda\, dl \int_0^{\pi} sin^2 \vartheta\, d\vartheta = \lambda\, d\, l \frac{\pi}{4}.$$

Mithin gibt ein beliebig gestalteter Glühfaden von der Länge L

$$J_s = \lambda \frac{\pi}{4} \int dl = \lambda L \frac{\pi}{4}.$$

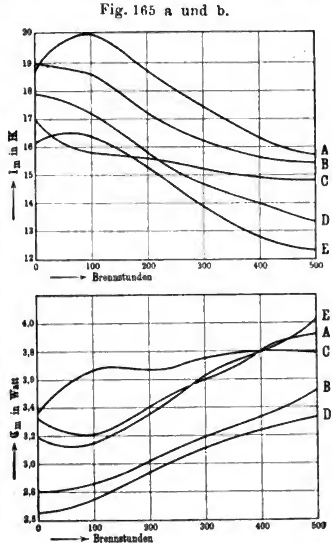
Nun ist λL für Type 2 gleich y'' und für Type 3, da der Faden in Richtung II nahezu unverkürzt erscheint, nahezu gleich y''.

Eine eingehendere theoretische Untersuchung von Geraden und Kreisbögen, aus welchen sich die Glühfäden im allgemeinen zusammensetzen, zeigt, daß die Methode 2 nahezu richtige Werte geben muß, und daß J_s/J_m zwischen $\pi/4$ und $\pi^2/8$ schwankt.

b) Spezifischer Verbrauch.

Einfluß des Präparierens. Die Fäden werden jetzt ausschließlich aus Cellulose, welche man z. B. aus einer Lösung von Kollodium in Essigsäure durch Denitrieren in Schwefelammonium gewinnt, hergestellt und meistens[1]) präpariert (Niederschlag von Graphit auf dem karbonisierten Faden, vgl. S. 8). Der präparierte Faden ist im Vergleich zum unpräparierten gleichmäßiger im Querschnitt, besitzt infolge der besseren Leitfähigkeit des Graphitniederschlages einen geringeren spezifischen Widerstand und ist widerstandsfähiger gegen das Zerstäuben, wodurch er konstanter in der Lichtstärke wird. Für gleichen spezifischen Verbrauch, gleiche Spannung und Lichtstärke muß der präparierte Faden länger und dünner als der unpräparierte gemacht werden.

Fig. 165 a und b.



Dauerprüfung. Die Lampen mit einem einfach schleifenförmigem Faden be-

[1]) Einzelne Fabriken sehen für Lampen zu mehr als 150 Volt vom Präparieren ab.

sitzen bei ihrer normalen Spannung von etwa 110 Volt anfangs meistens $\mathfrak{C}_m = 3{,}0$ bis 3,3 Watt, seltener 2,6 Watt und noch darunter. Wenn man die Lampen bei normaler Spannung längere Zeit brennen läßt, nimmt die Lichtstärke häufig zuerst zu, später aber stetig ab. In Fig. 165 a und b sind beispielsweise die Ergebnisse der Dauerprüfungen von fünf Lampensorten (*A* bis *E*) zu 110 bis 120 Volt zusammengestellt.

Die Sorten *A* bis *E* hatten also in 500 Brennstunden um 16 bzw. 18, 14, 25 und 24 Proz. ihrer Anfangslichtstärke abgenommen. Am günstigsten in bezug auf den spezifischen Verbrauch war die Sorte *D*; für dieselbe ergab sich unter Benutzung des Faktors $J_s/J_m = 0{,}85$ (Tabelle 2, S. 333)

nach 1 Brennstunde $\mathfrak{C}_m = 2{,}6$, also $\mathfrak{C}_s = 3{,}1$ Watt
„ 500 Brennstunden $\mathfrak{C}_m = 3{,}3$ „ $\mathfrak{C}_s = 3{,}9$ „

Die 220 Volt-Lampen verhalten sich ungünstiger [1]) als die Lampen zu 110 Volt.

Einfluß der Spannungsänderung. Wenn man die Spannung um 1 Proz. erhöht, wächst die Stromstärke auch um etwa 1 Proz., die Lichtstärke um etwa 6 Proz. [2]), so daß $\mathfrak{C}_m$ um etwa 4 Proz. kleiner wird. Lampen, welche mit einer gegen die normale erhöhten Spannung brennen, geben also anfangs ein günstigeres $\mathfrak{C}_m$, aber ihre Lichtstärke nimmt bald erheblich ab und $\mathfrak{C}_m$ erheblich zu. Lampen mit anfangs großem $\mathfrak{C}_m$ halten sich besser konstant; bei bedeutender Minderbelastung ($\mathfrak{C}_m$ größer als 5 Watt) ändert sich die Lichtstärke oft kaum innerhalb 1000 Brennstunden (Normallampen).

Die absolute Temperatur [3]) einer normalbrennenden starkfadigen Glühlampe liegt nach spektralbolometrischen Messungen von Lummer und Pringsheim zwischen 2100 und 1880°; nach einer spektralphotometrischen Methode erhalten beide Physiker als untere Grenze 2040°, so daß die Temperatur zwischen 2040 und 2100° eingeschlossen ist. In guter Übereinstimmung hiermit fand G. Schulze in der Reichsanstalt für eine gewöhnliche Glühlampe zu 110 Volt und 0,5 Ampere mittels des optischen Pyrometers von Holborn und Kurlbaum die schwarze Temperatur in Rot und Blau zu 2040 und 2060°, so daß sich hieraus auf eine wahre Temperatur von 2070° extrapolieren läßt.

Absolute und nützliche Lebensdauer. Unter der absoluten Lebensdauer versteht man die Brennzeit bis zum Durchbrennen oder Zerbrechen des Glühfadens, unter der nützlichen Lebensdauer oder Nutzlebensdauer die Brennzeit, nach welcher die Lichtstärke um einen willkürlich gewählten Bruchteil der Anfangslichtstärke abgenommen

---

[1]) Vgl. z. B. Bragstad, J. f. G. u. W. **42**, 9 (1899); Janet, Bull. Soc. Int. El. (2) **5**, 275 (1905); J. f. G. u. W. **48**, 748 (1905).

[2]) Vgl. S. 97, Anm. 1.

[3]) Über Temperaturmessungen siehe Anhang 6.

hat; der Verband Deutscher Elektrotechniker setzt eine Abnahme von 20 Proz. fest. Aus dem vorhergehenden erhellt, daß das Brennen bei einer höheren als der normalen Spannung die Lebensdauer erheblich herabsetzt. Bezüglich der Nutzlebensdauer sind von der Verkaufsstelle Vereinigter Glühlampenfabriken (V. V. G.) technische Bedingungen [1]) für die Lieferung von Glühlampen aufgestellt. Beispielsweise sollen Lampen zu 16 bis 32 HK für

45 bis 115 Volt und $\mathfrak{E}_m = 3,1$ Watt
116 „ 155 „ „ „ $= 3,3$ „
156 „ 240 „ „ „ $= 3,6$ „

eine Nutzlebensdauer von 600 Brennstunden haben. Da die Bestimmung einer solchen Zeit sehr umständlich und kostspielig ist, benutzt man in der Praxis vielfach ein abgekürztes Verfahren, indem man einen gewissen Prozentsatz (gewöhnlich 1 Proz.) aus den zu untersuchenden Lampen herausgreift und diese Probelampen nach Strecker [2]) mit einer Überspannung von 10 bis 15 Proz. oder nach Stern [3]) mit derjenigen Spannung, welche anfangs $\mathfrak{E}_m = 1,6$ Watt ergab, bis zu der willkürlich gewählten Lichtabnahme brennen läßt. Die so ermittelte Brennzeit soll dann ein richtiges Bild der nützlichen Lebensdauer geben. Alle solche Versuche können nach Strecker jedoch auf Genauigkeit keinen Anspruch erheben; für das einzige Mittel zur Bestimmung der nützlichen Lebensdauer hält er den Dauerversuch bei der normalen Spannung [4]).

Sogenannte metallisierte Kohlenfäden. Seit einiger Zeit werden Lampen in den Verkehr gebracht, bei welchen der Kohlenfaden, vor und nach der Präparierung, im elektrischen Ofen einer Temperatur von etwa 3000° ausgesetzt war. Diese Lampen zeigen bei einer höheren Beanspruchung $\mathfrak{E}_m$ als etwa 3 Watt einen positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes, d. h. der letztere nimmt wie derjenige der Metalle mit steigender Temperatur zu. Dagegen ist der Temperaturkoeffizient für die gewöhnlichen Lampen und diejenigen, bei welchen die Erhitzung des Fadens nach der Präparierung fortfällt, noch bei $\mathfrak{E}_m = 1,5$ Watt negativ.

Diese neueren Lampen nehmen nach Howell [5]), wenn sie mit einer Anfangsbeanspruchung $\mathfrak{E}_m = 2,5$, also $\mathfrak{E}_s = 2,9$ Watt, bezogen auf die englische Kerze, demnach mit

$$\mathfrak{E}_m = 2,2, \text{ also } \mathfrak{E}_s = 2,6 \text{ Watt auf 1 HK},$$

bei konstanter Spannung in Dauerprüfung genommen werden, in etwa 500 Brennstunden um 20 Proz. ihrer Anfangslichtstärke ab.

[1]) Mitteil. d. Vereinig. d. Elektrizitätswerke 3, 78 (1904).
[2]) Hilfsbuch f. d. Elektr. 1907, S. 613.
[3]) Mitteil. d. Vereinig. d. Elektrizitätswerke 3, 143 (1904).
[4]) Ein Vorschlag von Preece, mit Überspannungen von 70 und 130 Proz. zu arbeiten, kann deshalb unberücksichtigt bleiben.
[5]) Howell, Electrician (2) 55, 588 (1905); J. f. G. u. W. 49, 219 (1906).

§ 147. Nernstlampen.

Nernst erstrebt eine Verbesserung des Leuchteffektes durch selektive Emission und wählt hierzu Elektrolyte (S. 9). Nach Lummer und Pringsheim spielt hier jedoch die Temperaturerhöhung eine wesentliche Rolle (S. 55).

Der Nernstkörper leitet die Elektrizität erst bei höherer Temperatur (etwa 600° C). Man muß ihn deshalb vorwärmen; dies geschieht durch eine in der Nähe des Glühkörpers angeordnete elektrisch erwärmte Platinspirale, welche durch einen in den Stromkreis des Glühkörpers geschalteten Elektromagneten automatisch wieder ausgeschaltet wird, sobald der Glühkörper genügend leitungsfähig geworden ist. Der letztere glüht in freier Luft.

Der Glühkörper hat einen weit höheren negativen Temperaturkoeffizienten als Kohle. Infolgedessen machen sich Spannungsänderungen sehr störend bemerkbar. Deshalb ist ein Vorschaltwiderstand mit hohem Temperaturkoeffizienten erforderlich. Nach dem Vorgange von Potter benutzt man jetzt meistens dünnen Eisendraht, welcher in einer mit einem indifferenten Gase angefüllten Glasröhre ausgespannt ist und etwa 15 Proz. der Gesamtspannung absorbiert.

Lampenarten. Hergestellt werden von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft zu Berlin als der deutschen Patentinhaberin hauptsächlich zwei mit Modell A und B bezeichnete Lampentypen. Die ersteren werden vertikal hängend gebrannt. Auch bei den anderen Lampen wollen wir im folgenden stets die gleiche Stellung annehmen. Bei den A-Lampen (220 Volt und 1 bzw. 0,5 Amp.) befindet sich der Glühkörper in der Lampenachse; er ist also vertikal angeordnet. Die B-Lampen (220 Volt und 0,25 Ampere) besitzen entweder stabförmige Glühkörper, welche senkrecht zur Lampenachse, also horizontal, angeordnet sind, oder bügelförmige Glühkörper, deren Ebene die Lampenachse enthält. Außerdem sind besonders im Auslande Lampen mit bis zu sechs parallel geschalteten Glühkörpern in Gebrauch. Die von der oben genannten Gesellschaft für Demonstrationszwecke unter der Bezeichnung Projektionslampe hergestellten Lampen mit mehreren Glühkörpern lassen sich auch zu photometrischen Messungen als Zwischenlichtquellen (S. 152) benutzen.

Wegen der elektrolytischen Leitung ist für Gleichstrom die Stromrichtung vorgeschrieben.

Die absolute Temperatur liegt nach spektralbolometrischen Messungen von Lummer und Pringsheim zwischen 2450 und 2200°. G. Schulze findet für eine Lampe zu 110 Volt 0,5 Ampere, die schwarze Temperatur in rotem und blauem Lichte zu 2430 und 2450°, so daß die wahre Temperatur bei ungefähr 2490° liegen dürfte.

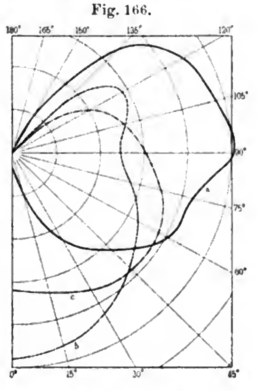
a) Lichtverteilung.

Modell *A*. Das Licht ist nahezu symmetrisch um die Lampenachse verteilt. Die Kurve der horizontalen Lichtverteilung ist demnach nahezu ein Kreis. Die Kurve *a* (Fig. 166) zeigt die räumliche Lichtverteilung. Es ist also J_m zugleich die maximale Lichtstärke J_{ma}. Im Mittel ergibt sich

$$J_s / J_m = 0{,}73 \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

statt des theoretischen Wertes $\pi/4$ — Gleichung 5) S. 334. — Diese Abweichung erklärt sich durch die Schattenwirkung des Sockels.

Fig. 166.



Modell *B*. Das Licht ist sehr ungleich um die Lampenachse verteilt. Die horizontale Lichtverteilungskurve hat ihr Maximum J_{ma} senkrecht zum Glühkörper und eine starke Einschnürung parallel zum Glühkörper. Bei den stabförmigen Glühkörpern wäre, wenn ihre Achse genau eine Gerade wäre, die Lichtstärke in Richtung dieser Achse gleich Null, und es wäre, bei Gültigkeit des $\cos \varepsilon$-Gesetzes (S. 77)

$$J_m = \frac{2}{\pi} J_{ma} \; (= 0{,}64 \, J_{ma}) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Denn es ist in einer Richtung, welche den Winkel ε mit der Senkrechten auf den Glühkörper bildet, die Lichtstärke dann gleich $J_{ma} \cos \varepsilon$, so daß

$$J_m = \frac{2}{\pi} J_{ma} \int_0^{\pi/2} \cos \varepsilon \; d\varepsilon = \frac{2}{\pi} J_{ma}.$$

Die räumliche Lichtverteilung einer Lampe mit stab- und bügelförmigem Glühkörper ist durch die Kurven *b* und *c* (Fig. 166) dargestellt. In beiden Fällen ergibt sich im Mittel

$$J_s / J_{ma} = 0{,}64 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

statt $\pi/4$; die Schattenwirkung des Sockels ist hier also noch größer als bei den *A*-Lampen.

b) Spezifischer Verbrauch.

Bei einer Reihe[1]) von 220 Volt-Lampen wurde gefunden

A-Lampen { nach 1 Brennstd. $\mathfrak{E}_m = 1{,}6$, also $\mathfrak{E}_s = 2{,}2$ Watt
„ 350 „ $\mathfrak{E}_m = 1{,}9$, „ $\mathfrak{E}_s = 2{,}6$ „

[1]) Z. f. Instrk. 23, 178 (1903).

B-Lampen { nach 1 Brennstd. $\mathfrak{E}_{ma} = 1{,}7$, also $\mathfrak{E}_s = 2{,}6$ Watt
„ 350 „ $\mathfrak{E}_{ma} = 2{,}0$, „ $\mathfrak{E}_s = 3{,}1$ „

Bei einer anderen Reihe ergaben sich ungünstigere Werte.

§ 148. Elektrische Metallfaden-Glühlampen.

a) Die Osmiumlampe (Auer-Oslampe). 1. Im Gegensatz zu Nernst sucht Auer, der seine Erfindung ungefähr gleichzeitig mit Nernst machte, die Ökonomie durch Erhöhung der Temperatur (vgl. S. 55) zu verbessern und wählt zu diesem Zwecke statt der Kohlenfäden Fäden aus dem schwer schmelzbaren Osmium (S. 9). Nach Lummer und Pringsheim verdankt die Osmiumlampe ihre relativ günstige Ökonomie jedoch ihren selektiven Eigenschaften (S. 54).

Der Glühfaden befindet sich wie der Kohlenfaden im Vakuum. Wegen seines im Vergleich zum Kohlenfaden verhältnismäßig geringen spezifischen Widerstandes konnte man bisher nur Lampen für höchstens 110 Volt[1]) Spannung herstellen. Die Lampen besitzen jedoch für gewöhnlich nur eine Spannung von 38 Volt, so daß man bei einer Netzspannung von 110 Volt und bei Gleichstrom dann immer drei Lampen hintereinander schalten muß. Bei Wechselstrom kann man allerdings jede Lampe einzeln brennen, wenn man die höhere Spannung mittels geeigneter Transformatoren in die niedrigere Lampenspannung umwandelt. Da der Glühkörper in der Weißglut weich wird, muß die Lampe vertikal hängend gebrannt werden.

Temperatur. Für eine 37 Volt-Lampe erhält G. Schulze in der Reichsanstalt pyrometrisch die schwarze Temperatur in rotem bzw. blauem Lichte zu 2160 bzw. 2210° abs.; die wahre Temperatur dürfte deshalb bei 2250° liegen.

Einfluß der Spannungsänderung. Einer Änderung der Spannung $\mathfrak{v}$ um 1 Proz. entspricht eine Änderung der Stromstärke $\mathfrak{i}$ um 0,7 Proz., der Lichtstärke J_s um 4,4 Proz., mithin des Gesamtverbrauches $\mathfrak{E} = \mathfrak{v}\mathfrak{i}$ um 1,7 Proz., des spezifischen Verbrauches um 2,6 Proz.; für den Kohlenfaden s. S. 336.

Die geringere Änderung von $\mathfrak{i}$ im Vergleich zum Kohlenfaden rührt vom positiven Temperaturkoeffizienten des Osmiums her. Die geringere Änderung von J_s läßt sich zum Teil durch die geringere Änderung von $\mathfrak{E}$ erklären. Aber auch bei gleicher Zunahme von $\mathfrak{E}$ wächst J_s beim Osmiumfaden weniger schnell als beim Kohlenfaden. Die Ursache hierfür dürfte in der höheren Temperatur des Osmiumfadens zu suchen sein, da der Exponent x (S. 95 und 96) mit wachsender Temperatur kleiner wird. Ähnliches gilt für die anderen Metallfadenlampen.

2. Räumliche Lichtverteilung. Die Lampen sind mit zwei oder drei langgestreckten bügelförmigen Fäden versehen und haben deshalb

[1]) Blau, J. f. G. u. W. **48**, 184 (1905).

nahezu dieselbe Lichtverteilung wie die Lampen 2 b (Tabelle 2, S. 333). Im Mittel ist

$$J_s/J_m = 0{,}79.$$

3. Spezifischer Verbrauch und Lebensdauer. Bei einer Reihe von 38 Volt-Lampen wurde in der Reichsanstalt gefunden

nach 0,5 Brennstd. $\mathfrak{E}_m = 1{,}5$, also $\mathfrak{E}_s = 1{,}9$ Watt
„ 2000 „ $\mathfrak{E}_m = 1{,}7$, „ $\mathfrak{E}_s = 2{,}2$ „

Die Lichtstärke nahm während dieser Zeit um 24 Proz. ab; alle Lampen überstanden die Dauerprüfung.

b) Die Tantallampe. 4. Sie ist eine Vakuumlampe und kann in jeder Stellung gebraucht werden. Der Faden ist zickzackförmig auf ein Gestell aufgewickelt, dessen Achse mit der Lampenachse zusammenfällt. Ein durchgebrannter Faden läßt sich oft wieder zusammenschweißen oder schweißt sich von selbst wieder zusammen, so daß die Lampe weiter brennt.

Die Lampen werden für 50 bis 120 Volt und in drei Typen hergestellt: Type *A* für 12 bis 15 HK, Type *B* für 30 bis 50 HK, Type *C* für 8 bis 16 HK.

5. Die räumliche Lichtverteilung ist zu Anfang ungefähr dieselbe wie bei der Osmiumlampe; sie ändert sich nach Sharp[1]) derart mit der Brennzeit, daß J_s/J_m von seinem durchschnittlichen Anfangswert 0,73 an stetig zunimmt. Dies erklärt Sharp hauptsächlich dadurch, daß die Glashülle in der Mitte am stärksten beschlägt, während sich bei Kohlenfadenlampen der Altersbeschlag über die ganze Glashülle gleichmäßig verteilt. In zweiter Linie soll die Änderung dadurch veranlaßt werden, daß der Faden immer rauher wird.

6. Spezifischer Verbrauch und Lebensdauer. J_m nimmt in den ersten 25 bis 50 Stunden etwa 10 Proz. zu und dann langsam wieder ab. Nach Angabe der Fabrikanten haben

> Type *A* und *B* bei einer Anfangsbeanspruchung $\mathfrak{E}_m = 1{,}5$ bis 1,7 Watt eine Nutzlebensdauer von 600 Brennstunden, Type *C* bei anfangs $\mathfrak{E}_m = 2{,}1$ bis 2,3 Watt eine Nutzlebensdauer von 800 Brennstunden. Die absolute Lebensdauer erreicht oft das Doppelte der Nutzlebensdauer.

c) Die Osram-, Wolfram- und Osminlampe[2]). 7. Die Lampen sind Vakuumlampen und müssen hängend gebrannt werden. Die Fäden sind wie bei der Osmiumlampe angeordnet. Ein durchgebrannter Faden läßt sich häufig wieder zusammenschweißen.

8. Die räumliche Lichtverteilung ist dieselbe wie bei der Osmiumlampe.

---

[1]) Electrician (2) 57, 492 (1906).

[2]) Diese Lampen sind während der Drucklegung hinzugekommen.

9. Spezifischer Verbrauch und Lebensdauer. *Die Osramlampe.* In der Reichsanstalt wurden zwei Sorten zu $J_m = 28$ HK (117 Volt) und 32 HK (111,5 und 114 Volt) bei konstanter Spannung mit Wechselstrom in Dauerprüfung genommen. Die Sorten verhielten sich nahezu gleich und ergaben im Mittel [1])

	nach 0,4	200	1000 Brennstunden
	$\mathfrak{C}_m = 1{,}1$	1,06	1,16 Watt
so daß	$\mathfrak{C}_s = 1{,}39$	1,33	1,45 „

Die Lichtstärke nahm während der ersten 200 Brennstunden im Mittel um 6 Proz. zu; sie nahm dann langsam wieder ab und war nach 1000 Brennstunden im Mittel um 5 Proz. kleiner als anfangs. Die absolute Lebensdauer wird von den Fabrikanten zu mindestens 1000 Brennstunden angegeben.

Ähnlich wie die Osramlampe verhalten sich die *Wolframlampe* (Patent Just und Hanamann) nach den Messungen der Fabrikanten [2]), die *Wolframlampe* (Patent Kužel) nach den Messungen der Fabrikanten [3]) und des technologischen Gewerbemuseums und die *Osminlampe* nach den Messungen des technologischen Gewerbemuseums.

d) Die Zirkonlampe. Wie 7. Nach Angabe des Fabrikanten soll sie für $\mathfrak{C}_m = 1$ Watt eine durchschnittliche Lebensdauer von 500 Brennstunden haben.

e) Iridiumlampe. Wie 7. Meßergebnisse sind noch nicht veröffentlicht.

Ausführlichere Mitteilungen über diese neueren Lampen macht Böhm [4]).

Die Lampen a bis c können nach Uppenborn [5]) und Lux [6]) bedeutende Überspannungen aushalten.

§ 149. Bogenlampen.

a) Lampen mit gewöhnlichen Kohlen (Homogen- und Dochtkohlen).

1. Offener Lichtbogen.

Gleichstrom. Die positive Kohle höhlt sich kraterförmig aus, während sich die negative etwas zuspitzt. Der Krater wird an einer sehr kleinen Stelle bis zu sehr hoher Weißglut, nach S. Thompson sogar bis zum Sieden (vgl. S. 138) erhitzt.

---

[1]) E. T. Z. **27**, 749 (1906); J. f. G. u. W. **49**, 914 (1906).
[2]) Elektrotechnik und Maschinenbau **24**, 382 (1906).
[3]) Ebenda **24**, 119 (1906).
[4]) J. f. G. u. W. **49**, 709 und 733 (1906).
[5]) Mitteil. d. Vereinig. d. Elektrizitätswerke **5**, 146 (1906).
[6]) Z. f. Bel. **12**, 267 (1906).

Die maximale absolute Temperatur des Kraters[1]) liegt nach Lummer und Pringsheim zwischen 4200 und 3750°; nach Abney und Festing zwischen 4000 und 3600°; sie beträgt nach Violle 3900°, nach Wilson und Gray 3600°, nach Wanner 3700° für die Dochtkohle und 3850° für die Homogenkohle. Die Temperatur der negativen Kohle beträgt etwa 3000°.

Infolge der höheren Temperatur strahlt die positive Kohle am stärksten (S. 5 unten). Deshalb nimmt man bei Bodenbeleuchtung — und hiermit hat man es in der Praxis am meisten zu tun — die positive Kohle als die obere. Über Lampen mit positiver Unterkohle s. § 155.

Die Größe der Kraterfläche ändert sich ungefähr proportional der Stromstärke und wächst mit dem Kohlenabstande. Die Tiefe der Aushöhlung wächst bei gleicher Stromstärke mit abnehmender Bogenlänge.

Fig. 167.

Zwischen der Spannung $\mathfrak{v}$ an den Kohlenstäben, der Lichtbogenlänge l und der Stromstärke i besteht nach S. Thompson[2]) die Formel $\mathfrak{v} = a + bl/\mathrm{i}$; Hertha Ayrton[3]) findet für Homogenkohlen $\mathfrak{v} = a' + b'l + (c + dl)/\mathrm{i}$, wo a bis d Konstanten sind.

Über Flächenhelle des Kraters s. S. 139.

Die räumliche Lichtverteilungskurve ändert sich bei allen Bogenlampen mit der Natur der Kohlen und ist auch bei denselben Kohlen noch Schwankungen unterworfen. Im Mittel aus einer Reihe gewöhnlicher Kohlen ergibt sich bei Gleichstrom für die nackte Lampe die Kurve a, für die mit einer Milchglasglocke versehene Lampe die Kurve b (Fig. 167).

Der nackte Bogen besitzt also eine sehr ungleiche Lichtverteilung. J_{ma} liegt unter etwa 45° (40 bis 50°). Nach oben gelangt wenig Licht (durchschnittlich $^1/_{10}$ des nach unten gehenden). Die ellipsenartige Gestalt der Kurve a erklärt Trotter[4]) folgendermaßen. Der Krater ist die Hauptlichtquelle und befolgt das $\cos\varepsilon$-Gesetz (S. 77). Würde derselbe allein und frei strahlen, so wäre die Lichtverteilungskurve der in Fig. 167 punktiert gezeichnete Halbkreis c. Der Überschuß der Kurve a gegenüber dem Halbkreise rührt hauptsächlich von der negativen Kohle her, während das bedeutende Zurückbleiben der Kurve a gegen den Halbkreis für $\vartheta < 40°$ durch die Schattenwirkung

[1]) Lummer, Rayonnement des corps noirs, Paris 1900, p. 96.
[2]) Electrician (2) 29, 460 (1892).
[3]) Ebenda (2) 34, 335 (1894/95); (2) 35, 418 (1895).
[4]) Ebenda (2) 28, 687 (1891/92); E. T. Z. 13, 433 (1892).

der Unterkohle veranlaßt wird, welche um so mehr Kraterlicht abblendet, je kleiner ϑ wird, und vertikal nach unten überhaupt kein Licht gelangen läßt.

Glocken. Sie bezwecken 1. die Lichtverteilung gleichmäßiger zu machen, besonders in der Nähe der Vertikalen (s. Kurve *b*), 2. das Auge vor dem Geblendetwerden zu bewahren, 3. die Lampe vor Witterungseinflüssen zu schützen. Wünscht man nur die letztere Schutzwirkung, so verwendet man statt der sonst üblichen Glocken aus durchscheinendem oder halbdurchscheinendem Glase solche aus Klarglas.

Der Lichtverlust[1]) durch Glocken beträgt nach v. Hefner-Alteneck[2]) bei mattgeschliffenem Glase und Alabasterglas 15 Proz., bei Opalglas 20 Proz., bei Milchglas 30 bis 60 Proz., d. h. es ist J_s mit Glocke um diese Beträge kleiner als ohne Glocke. Der Lichtverlust beträgt bei dem neueren, von Schott und Genossen hergestellten Milchglase nach Schott und Herschkowitsch[3]) 5 bis 15 Proz. Die Überfangglasglocken, bei welchen eine dünne Opalschicht auf die innere Seite der Klarglasglocke aufgetragen ist, schwächen das Licht um etwa 11 Proz. (Stort, Utzinger). Die Holophanglocken von Blondel und Psaroudaki bewirken einen Lichtverlust von höchstens 10 Proz. (Blondel, Drehschmidt). Es sind dies Glocken aus gewöhnlichem oder Kristallglas, die außen und innen Riefen tragen; die äußeren verlaufen wagerecht, die inneren von oben nach unten; hierdurch wird bewirkt, daß die ganze Glocke ziemlich gleichmäßig leuchtend erscheint. Eine mit Drahtgeflecht umhüllte Klarglasglocke schwächt das Licht um 6 Proz. (Stort, Nerz).

Annäherungsformel für J_s. Gelegentlich der Untersuchungen für die Pariser Elektrizitäts-Ausstellung von 1881 wurde die Formel benutzt

$$J_s = {}^1/_2\, J_m + {}^1/_4\, J_{ma}.$$

Nach Wybauw beträgt die Abweichung zwischen Beobachtung und Rechnung im Mittel ± 6 Proz., nach Marks $+9$ Proz.; jedoch weisen

---

[1]) Ist Φ der von der nackten Lampe ausgesandte Gesamtlichtstrom, Φ' der aus der Glocke austretende Gesamtlichtstrom, so ist der relative Lichtverlust $(\Phi - \Phi')/\Phi$. Diese Größe gibt jedoch nicht das wirkliche Absorptionsvermögen A der Glocke (S. 16), sondern das sogenannte scheinbare Absorptionsvermögen, und zwar ist

$$(\Phi - \Phi')/\Phi = A/(1-f),$$

wenn die Glocke allseitig geschlossen ist und an allen Stellen ihrer Innenseite und unter allen Einfallswinkeln den gleichen Bruchteil f teils regelmäßig, teils diffus reflektiert. Alsdann ist nach dem Satze von Mascart (S. 375) — vgl. auch Kugelphotometer, S. 301 u. 302 — der auf die Innenseite der Glocke nach unendlich vielen Reflexionen auffallende Lichtstrom gleich $\Phi/(1-f)$; von diesem wird $A\,\Phi/(1-f) = \Phi - \Phi'$ absorbiert, woraus sich obige Gleichung ergibt.

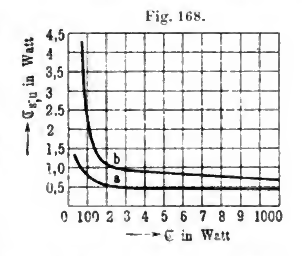
[2]) E. T. Z. **4**, 445 (1883).

[3]) J. f. G. u. W. **44**, 461 (1901).

die einzelnen Messungen weit größere Abweichungen auf. Die Formel ist also nur in ganz roher Annäherung gültig.

Der spezifische Verbrauch hängt außer von der Natur der Kohlen noch von verschiedenen Faktoren ab. Umfangreiche diesbezügliche Untersuchungen, die Blondel[1]) unter Mitwirkung von Jigouzo mittels Lumenmeters anstellte, führten zu folgendem Ergebnis. Bei gleicher Spannung und Stromstärke läßt sich J_s durch Anwendung dünnerer Kohlen über das Doppelte[2]) des bei den gewöhnlichen Kohlenstärken zu erreichenden Wertes steigern; aber dünnere Kohlen haben eine kurze Lebensdauer, was ihrer allgemeinen Verwendungsfähigkeit im Wege steht. Bei gegebener Stromstärke und für gegebene Kohlendurchmesser besteht eine günstigste[3]), von der Natur der Kohlen abhängige Spannung. Bei gleicher Spannung und gleichem Kohlendurchmesser ist J_s eine hyperbolische Funktion der Stromstärke. Bei gleicher Stromdichte (Kohlendurchmesser auf 1 Ampere) sind Lampen mit höherer Stromstärke günstiger als solche mit niedrigerer; man sollte also möglichst große Lampen wählen.

Fig. 168.



Unter den günstigsten Bedingungen erhielt Blondel für eine Reihe von Kohlensorten

$\mathfrak{E}_s = 0{,}50$ bis $1{,}25$ Watt.

In Übereinstimmung hiermit findet Wedding[4]) aus Versuchen, die sich auf Gesamtenergieaufwendungen $\mathfrak{E}$ von 48 bis 1080 Watt erstrecken, daß die Lampen mit steigendem $\mathfrak{E}$ immer günstiger brennen. In Fig. 168, Kurve *a*, sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Die Kurve nimmt von $\mathfrak{E} = 48$ bis 109 Watt sehr schnell, sodann bis 300 Watt immer langsamer und bei weiterer Steigerung nur noch wenig ab. Speziell ergibt sich für

$\mathfrak{E} =$	48	109	150	300	1000 Watt
$\mathfrak{E}_{s,u} =$	1,25	0,75	0,68	0,50	0,45 „

Die entsprechenden Zahlen für $\mathfrak{E}_s$ sind nahezu doppelt so groß.

In der Reichsanstalt wurde gefunden:

günstigstenfalls $\mathfrak{E}_s = 0{,}8$, im Mittel $\mathfrak{E}_s = 1{,}0$ Watt.

[1]) L'Éclair. électr. **8**, 9 (1896); **10**, 289 (1897); **24**, 342 (1900).

[2]) Es wurde jedoch das Gesetz von Schreihage, Zentralbl. f. Elektr. **10**, 591 (1888) nicht bestätigt gefunden, nach welchem J_s dem Kohlendurchmesser umgekehrt proportional sein sollte.

[3]) Vgl. Vogel, Zentralbl. f. Elektr. **9**, 189 u. 216 (1887).

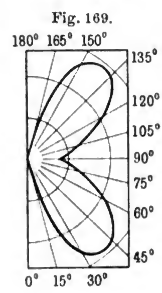
[4]) E. T. Z. **18**, 716 (1897).

Diese Zahlen beziehen sich auf die in der Lampe selbst verbrauchte Energie. In der Praxis hat man jedoch auch noch die im Vorschaltwiderstand verbrauchte Energie in Rechnung zu ziehen. Wenn man z. B. bei einer Betriebsspannung von 110 Volt zwei Lampen mit je 40 Volt hintereinander schaltet, so ist der spezifische Verbrauch mit Einschluß des Vorschaltwiderstandes gleich dem 55/40fachen des spezifischen Verbrauches nach Ausschluß des Vorschaltwiderstandes. Außerdem hat man hier, wie bei allen Bogenlampen, den Lichtverlust durch die Glocken zu berücksichtigen.

Bei den Voltalampen ist der Spannungsverlust im Vorschaltwiderstand bei einer Betriebsspannung von 110 Volt weit geringer (S. 10). Nach Wedding[1]) brennen diese Lampen nahezu so ökonomisch wie Lampen mit der normalen Spannung und derselben Lichtstärke. Dagegen hat Blondel[2]) ungünstigere Werte erhalten; alle Zusätze zu den Elektroden, welche die Spannung erniedrigen, vergrößern den spezifischen Verbrauch.

Wechselstrom. Räumliche Lichtverteilung. Da bei jedem Stromwechsel die Pole sich vertauschen, bildet sich auf jeder Kohlenspitze ein kleiner Krater, und es erreichen beide Kohlen die gleiche Temperatur, welche zwischen den Temperaturen der positiven und negativen Kohle für Gleichstrom liegt. Dementsprechend erfolgt die Lichtstrahlung nahezu symmetrisch zu der durch den Lichtbogen gelegten Horizontalebene. Fig. 169 zeigt die Lichtverteilung einer nackten Lampe bei schwachem Strom. Diese Kurve hat eine sehr starke Einschnürung in der Horizontalen, wie zuerst von Uppenborn gefunden wurde. Mit wachsender Stromstärke wird diese Einschnürung immer schwächer. Bei einer Lampe, die mit einem in der Praxis üblichen Coerperschen Reflektor aus einer weiß emaillierten Eisenscheibe nahe über dem Bogen versehen war, fand Wedding[3]) J_m / J_{ma} für geringe Stromstärken zu 0,2, für hohe Stromstärken zu 0,5. Diese Änderung der Lichtverteilung rührt hauptsächlich daher, daß mit zunehmender Stromdichte immer mehr Teile nach dem Umfang der Kohlen ins Glühen geraten.

Fig. 169.



Annäherungsformeln für J_s. Wenn J_{ma} und J'_{ma} die maximalen Lichtstärken nach unten und oben bezeichnen, gilt nach Blondel[4]) für die nackte Lampe

[1]) E. T. Z. 20, 65 und 263 (1899).
[2]) L'Éclair. électr. 24, 342 (1900).
[3]) E. T. Z. 18, 716 (1897).
[4]) L'Eclair. électr. 3, 57 (1895).

bis 10 Ampere $J_s = {}^1/_2 J_m + {}^1/_4 (J_{ma} + J'_{ma})$;
über 10 „ $J_s = {}^1/_8 J_m + {}^1/_4 (J_{ma} + J'_{ma})$;
in der Nähe von 10 „ $J_s = {}^1/_4 J_m + {}^1/_4 (J_{ma} + J'_{ma})$.

Der spezifische Verbrauch hängt nach Blondel und Jigouzo[1]) in derselben Weise wie bei Gleichstromlampen von der Natur und dem Durchmesser der Kohlen, der Stromstärke und Spannung ab. Es hat keinen Zweck, die Wechselzahl über eine gewisse Grenze hinaus zu erhöhen. Die Wahl der Kohlen richtet sich nach der Wechselzahl. Für eine Reihe von Kohlen fanden sie unter den günstigsten Bedingungen

$$\mathfrak{E}_s = 0{,}71 \text{ bis } 2{,}5 \text{ Watt.}$$

Demnach wäre der Gleichstrom dem Wechselstrom überlegen.

Auch Wedding[2]) erhält bei gleicher Stromstärke und Spannung mit dünneren Kohlen günstigere Werte als mit dickeren und stellt bei gegebener Stromstärke eine günstigste Spannung fest. Wie beim Gleichstrombogen nimmt $\mathfrak{E}_{s,u}$ mit wachsendem $\mathfrak{E}$ zuerst sehr schnell, dann immer langsamer ab (Fig. 168, Kurve b, S. 345). Speziell ergab sich für

$\mathfrak{E} =$	75	250	1000 Watt
$\mathfrak{E}_{s,u} =$	4,4	1,0	0,68 „

Da die hierbei benutzte Lampe mit einem Reflektor versehen war, der 50 Proz. des nach oben gehenden Lichtstromes nach unten reflektierte, so erhält man $\mathfrak{E}_s$ für den nackten Bogen aus den Zahlen $\mathfrak{E}_{s,u}$ durch Multiplikation mit 1,5. Aus dem Vergleiche dieser Zahlen $\mathfrak{E}_s$ mit den Größen $\mathfrak{E}_s$, welche man aus den Weddingschen Werten $\mathfrak{E}_{s,u}$ auf S. 345 findet, würde sich unter der Annahme, daß bei allen Messungen gleichwertige Kohlen benutzt wurden, ergeben, daß der Wechselstrom nicht wesentlich ungünstiger als der Gleichstrom ist.

Wedding vergleicht jedoch unmittelbar die von ihm für $\mathfrak{E}_{s,u}$ gefundenen Werte und findet von diesem Gesichtspunkte aus — in Übereinstimmung mit Blondel, Fleming und Petavel —, daß der Gleichstrom günstiger als der Wechselstrom ist.

S. Thompson behauptet Gleichwertigkeit beider Betriebsarten.

2. Eingeschlossener Lichtbogen.

Bei diesen Lampen befinden sich die Kohlen in einer gegen die Außenluft möglichst abgeschlossenen Hülle und brauchen, da sie langsam abbrennen, nur alle 100 bis 150 Stunden erneuert zu werden. Die Lampen sind für eine Betriebsspannung von 110 Volt konstruiert; sie besitzen aber am Lichtbogen nur eine Spannung von etwa 75 bis 80 Volt, so daß etwa 35 bis 30 Volt in einem Vorschaltwiderstande, der meistens in die Lampe eingebaut ist, vernichtet werden müssen.

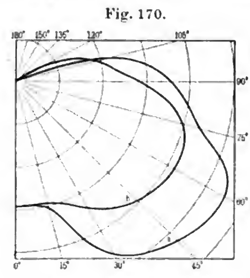
---

[1]) L'Éclair. électr. 21, 141 (1899); 24, 342 (1900).
[2]) E. T. Z. 18, 716 (1897); 19, 863 (1898).

Man benutzt als Elektroden entweder nur Homogen- oder nur Dochtkohlen. Der Lichtbogen ist länger, der Krater flacher als bei den gewöhnlichen Bogenlampen. Infolge des Wanderns des Lichtbogens ist die Lichtstärke in ein und derselben Richtung sehr starken Schwankungen unterworfen, was die Messungen sehr erschwert (vgl. S. 295).

Die räumliche Lichtverteilungskurve der Lampe ohne Reflektor und äußere Glocke hat im allgemeinen ungefähr dieselbe Gestalt wie die des gewöhnlichen offenen Bogens, gleichviel ob die die Luft abschließende Hülle aus Klarglas oder durchscheinendem Glase ist. Nur in einem Falle ergab sich in der Reichsanstalt bei ein und derselben Lampe mit einer Hülle aus Klarglas die gewöhnliche Kurve und mit einer Hülle aus durchscheinendem Glase, welche einen Lichtverlust von 25 Proz. veranlaßte, nahezu ein um den Lichtbogen beschriebener Halbkreis. Die Kurven *a* (ohne äußere Glocke) und *b* (mit äußerer Glocke) in Fig. 170 geben die Lichtverteilung einer mit einem Reflektor versehenen Lampe.

Fig. 170.



Der spezifische Verbrauch. Bei den folgenden Angaben für $\mathfrak{E}_s$ und $\mathfrak{E}_{s,u}$ gilt die eingeklammerte Zahl mit Einschluß, die nicht eingeklammerte nach Ausschluß des Vorschaltwiderstandes.

Gleichstrom. Blondel und Jigouzo fanden $\mathfrak{E}_s = 1{,}2\ (1{,}6)$ Watt. Wedding erhielt $\mathfrak{E}_{s,u} = (1{,}08)$ bis $(2{,}90)$ Watt. Von der Reichsanstalt wurde $\mathfrak{E}_s$ im günstigsten Falle zu 1,1 (1,5), im Mittel zu 1,6 (2,4) Watt ermittelt. Diese Zahlen beziehen sich auf Lampen mit Stromstärken von 3 bis 8 Amp.

Die Lampen mit kleineren Stromstärken (1,5 bis 3 Amp.), welche neuerdings vielfach verwendet werden, besonders für kleinere Innenräume, geben ein etwas ungünstigeres $\mathfrak{E}_s$.

Wechselstrom. Matthiews, Thompson und Hilbish erhielten $\mathfrak{E}_s = 3{,}0\ (3{,}7)$ bis $4{,}4\ (5{,}8)$ Watt.

Die Lampe mit eingeschlossenem Lichtbogen nimmt also eine Mittelstellung zwischen der Lampe mit offenem Lichtbogen und der gewöhnlichen Kohlenfaden-Glühlampe ein. Ihre Hauptvorzüge sind die Ersparnis an Kohlen und Bedienung, sowie ihre Verwendbarkeit als Einzellampe.

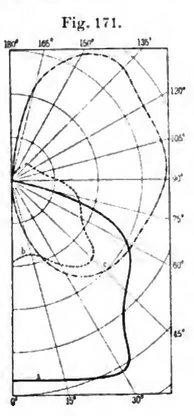
b) Lampen mit besonders getränkten Kohlen (Flammenbogenlampen, Bremerlicht).

Die außerordentlich günstige Lichtwirkung dieser Lampen beruht in erster Linie auf Lumineszenzerscheinungen (S. 5 und 55). Die

Kohlen sind entweder nach dem Vorgange von Bremer etwa 20 bis 30° gegeneinander abwärts geneigt oder stehen wie bei den gewöhnlichen Lampen senkrecht übereinander. Bei den schräg gestellten Kohlen befindet sich nahe über dem Lichtbogen ein kleiner Reflektor.

Die räumliche Lichtverteilung einer Lampe mit schräg stehenden Kohlen ohne und mit Glocke ist aus den Kurven *a* und *b*, Fig. 171, ersichtlich. Die Kurven gelten sowohl für Gleich- als Wechselstrom. Eine mit übereinanderstehenden Kohlen versehene nackte Gleichstromlampe lieferte die Kurve *c*, Fig. 171.

Fig. 171.



Der spezifische Verbrauch. Laporte[1]) untersuchte eine Gleichstromlampe für eine Stromstärke von 9 Ampere bei Spannungen von 24 bis 45 Volt. Hierbei änderte sich $\mathfrak{E}_s$ von 0,74 bis 0,38 Watt auf 1 bougie décimale. Von der Reichsanstalt wurde für Gleichstrom $\mathfrak{E}_s = 0{,}36$ (bei 46 Volt) bis 0,48 (bei 36 Volt) und für Wechselstrom $\mathfrak{E}_s = 0{,}34$ (bei 44 Volt) bis 0,59 (bei 48 Volt) gefunden. Die Gleichstromlampe und die Wechselstromlampe sind hier also einander ungefähr gleichwertig, was auch Wedding festgestellt hat.

Der Verlust im Vorschaltwiderstand ist bei diesen Zahlen nicht berücksichtigt.

c) Die Elektrolytbogenlampe von Rasch[2]).

Es werden statt Elektroden aus Kohle solche aus Elektrolytmasse, z. B. Magnesia und Zirkon, benutzt. Die Vorwärmung geschieht mittels einer Zündflamme oder eines Hilfsflammenbogens. Das Elektrolytbogenlicht zeigt ein sehr helles, farbiges Linien- und Bandenspektrum. Durch Wahl geeigneter Elektrolytmassen läßt sich das Licht beliebig färben, z. B. durch Magnesia, Chromoxyd und Nickeloxyd gelblich.

Rasch unterscheidet harte Elektroden mit hohem Kaltwiderstand und hoher Anlaßtemperatur und weiche Elektroden mit mäßigem Kaltwiderstand und geringer Anlaßtemperatur; die letzteren sind weniger günstig. Der Abbrand ist ein sehr geringer, so daß kein komplizierter Reguliermechanismus erforderlich ist.

Nach Rasch nimmt der spezifische Verbrauch bei gleichbleibender Bogenlänge mit steigendem Gesamtenergieverbrauch $\mathfrak{E}$ bis zu 0,19 Watt ab und bei noch höherem $\mathfrak{E}$, wo die Elektroden anfangen flüssig zu werden, wieder zu. Speziell für Elektroden von 2,5 und 5,0 mm Durchmesser und bei Lichtstärken von 600 bis 1000 HK war der

[1]) Bull. Soc. Intern. Électr. (2) **1**, 360 (1901).

[2]) E. T. Z. **22**, 155 (1901).

spezifische Verbrauch 0,25 bis 0,30 Watt. Hierbei wurde stets die horizontale Lichtstärke zugrunde gelegt. Da die räumliche Lichtverteilung nicht bestimmt wurde, läßt sich eine Umrechnung auf mittlere räumliche Lichtstärke nicht ausführen.

d) Quecksilberbogenlampen.

Die Lampe besteht in ihrer für den Gebrauch bestimmten Form aus einer geschlossenen, evakuierten Glas- oder Quarzröhre, an deren oberem Ende eine positive Eisen- oder Nickelelektrode und an deren unterem Ende eine kleine Menge Quecksilber als negative Elektrode sich befindet. Sie wird schräg aufgehängt, meistens unter einem Winkel von etwa 70° gegen die Vertikale (vgl. Fig. 172). Die Inbetriebsetzung geschieht gewöhnlich entweder durch Kippen der Lampe oder mittels eines starken Stromstoßes von weit höherer Spannung als die Betriebsspannung ist.

Die im praktischem Gebrauch befindlichen Lampen aus gewöhnlichem Glase besitzen bei ihrer normalen Spannung das reine Linienspektrum des Quecksilbers. Die Quarzlampe von Heraeus, welche eine höhere Beanspruchung (Drucke des Quecksilberdampfes bis zu mehreren Atmosphären) zuläßt, zeigt, wenn sie bei hohen Spannungen benutzt wird, neben diesen Linien noch ein schwaches kontinuierliches Spektrum. Offenbar spielt im letzteren Falle außer der Lumineszenz auch noch die reine Temperaturstrahlung eine gewisse Rolle.

Die hellsten Linien sind zwei gelbe (Wellenlängen 579,1 und 577,0 $\mu\mu$), eine grüne (491,6 $\mu\mu$), eine blaue (435,8 $\mu\mu$) und zwei violette (407,8 und 404,7 $\mu\mu$). Die Wirkung dieses Linienspektrums ist, daß die Farbe aller im Tageslicht rötlich erscheinenden Gegenstände erheblich verändert wird; z. B. erscheint ein rein roter Gegenstand schokoladenbraun, die Haut des Menschen bläulichgrün. Zur Verbesserung der für die Beleuchtungstechnik sehr ungünstigen Farbe des Quecksilberlichtes wendet man rot fluoreszierende Stoffe, z. B. Rhodamin auf Seide, an oder schaltet die Quecksilberlampe mit gewöhnlichen Glühlampen zusammen (Orthochromlampen). Heraeus fügt rotes Licht durch Mischungen von Quecksilber mit Cadmium, Zinn und dgl. hinzu. Neuerdings schlagen Gehrcke und v. Baeyer[1]) Zink- und Wismutamalgame vor.

Die räumliche Lichtverteilung einer Quarzlampe zu 194 Volt und einer gewöhnlichen Lampe zu 65 Volt zeigen die Kurven *a* und *b*, Fig. 172; die Ausstrahlungswinkel werden hierbei von der Achse des Leuchtrohres (Lampenachse) gezählt. Für diese Lampen war

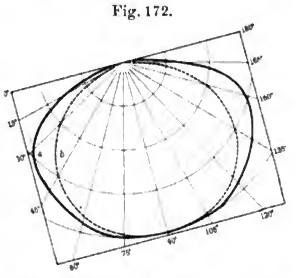
$$J_s / J_m = 0{,}87 \text{ bzw. } 0{,}80.$$

---

[1]) E. T. Z. 27, 383 (1906).

Der spezifische Verbrauch. Nach Messungen von **Küch** und **Retschinski**[1]) an Quarzlampen nimmt $\mathfrak{E}_m$, wenn man von relativ kleinem Energieverbrauch $\mathfrak{E}$ ausgeht, mit wachsendem $\mathfrak{E}$ zuerst zu und nach Erreichung eines Maximums (des ungünstigsten Wertes) zunächst sehr schnell und später immer langsamer ab[2]). Dies wird durch den allmählich immer stärker werdenden Einfluß der Temperaturstrahlung gegenüber dem der Lumineszenz erklärt. Bei einer Versuchsreihe erstreckte sich der Meßbereich für $\mathfrak{E}$ von 51,3 Watt (27 Volt, 1,90 Amp.) bis 1170 Watt (304 Volt, 3,85 Amp.), und für den letzteren Wert war $\mathfrak{E}_m$ = 0,165 Watt, so daß $\mathfrak{E}_s$ = 0,185 Watt; der Maximalwert von $\mathfrak{E}_m$ war 0,94 Watt bei $\mathfrak{E}$ = etwa 100 Watt.

Fig. 172.



In der Reichsanstalt wurde $\mathfrak{E}_s$ ohne Berücksichtigung des Vorschaltwiderstandes für eine Quarzlampe bei höherer Beanspruchung zu 0,27 Watt[1]), für gewöhnliche Lampen bei der üblichen Beanspruchung im günstigsten Falle zu 0,4 Watt gefunden. Nach **v. Recklinghausen**[3]) ist $\mathfrak{E}_s$ = 0,33 bis 0,45 Watt.

Schott und Genossen benutzen statt Quarz eine neue Glassorte (**Uviol**), welche ebenfalls für ultraviolette Strahlen durchlässig ist.

§ 150. Lampen mit gasförmigem Brennstoff.

a) Leuchtgasbrenner.

1. Schnitt-, Zweiloch- und Argandbrenner.

Lichtverteilung. Die Schnitt- und Zweilochbrenner besitzen senkrecht zur Breitseite die maximale, in der horizontalen Richtung der Breitseite eine nur um wenige Prozent geringere Lichtstärke. Die Argandbrenner besitzen nach allen Richtungen der Horizontalen nahezu die gleiche Lichtstärke. Die Kurve der räumlichen Lichtverteilung ist nahezu kreisförmig. Die Lichtstärke nimmt erst in der Nähe der nach unten gehenden Vertikalen infolge der Abblendung des Lichtes durch die Lampenteile schnell ab und ist in der Vertikalen gleich Null. Es ergibt sich im Mittel

$$J_s / J_m = 0{,}95 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

[1]) Ann. d. Phys. (4) **20**, 563 (1906).

[2]) Dasselbe Verhalten zeigt auch die ultraviolette Strahlung; die Stärke derselben wächst mit steigender Belastung schneller als die der sichtbaren Strahlung.

[3]) E. T. Z. **25**, 1102 (1904); J. f. G. u. W. **48**, 293 (1905).

Der spezifische Verbrauch. Es ergab sich in früheren Jahren für gute Schnitt- und Zweilochbrenner bzw. Argandbrenner

$$\mathfrak{C}_s = 16 \text{ bzw. } 10 \text{ Liter.}$$

Diese Brenner haben in der Beleuchtungstechnik jetzt nur noch eine untergeordnete Bedeutung. In Gasanstalten werden sie nur noch für das Photometrieren des Leuchtgases benutzt (vgl. § 157).

2. Glühlichtbrenner (Gasglühlicht).

Sehr eingehend beschäftigt sich Böhm[1]) in seinem Werke „Das Gasglüblicht" mit allen hierbei in Betracht kommenden Fragen.

Theorie des Gasglühlichtes. St. John[2]) zeigte, daß der Auerstrumpf rein thermactin (S. 4) strahlt. Lummer und Pringsheim erhalten spektralbolometrisch als Temperaturgrenzen des Auerstrumpfes 2450 und 2200° abs. Rubens findet in guter Übereinstimmung mit Holborn und Kurlbaum pyrometrisch rund 1800° abs. an der heißesten Stelle. Nach Féry beträgt die Maximaltemperatur des Bunsenbrenners 2140° abs., nach Kurlbaum und Schulze 2090° abs.

Die verhältnismäßig günstige Lichtwirkung des Glühstrumpfes wird in den neueren Arbeiten durch die feine Massenverteilung sowie das im sichtbaren Spektralgebiet hohe Emissionsvermögen des Strumpfes erklärt. St. John betrachtet außer diesen Eigenschaften noch das geringe Wärmeleitungsvermögen als maßgebend, Killing[3]) eine Art katalytischer Wirkung der Strumpfmasse, Bunte[4]) die katalytische Wirkung des Ceroxyds in Verbindung mit seiner feinen Massenverteilung und der schlechten Wärmeleitung des Thoroxyds. Le Chatelier und Boudouard[5]), sowie Nernst und Bose[6]) schlossen aus optischen Versuchen, insbesondere aus der Abnahme des Emissionsvermögens H_λ (S. 43) von Blau nach Rot hin auf eine geringe ultrarote Strahlung.

Diese Ansicht fand Rubens[7]) vollständig bestätigt. Derselbe stellte im Wellenlängengebiet $\lambda = 0{,}45$ bis $18\,\mu$ mittels seiner linearen Thermosäule (S. 24) Versuche an und fand folgendes. H_λ ist im Blau sehr hoch (0,86), nimmt nach Rot hin stark ab (0,062). Zwischen 1 und $5\,\mu$, in welchem Gebiet unsere meisten Lichtquellen am stärksten strahlen, ist H_λ kleiner als 0,02; erst im Gebiet der langen Wellen, in dem die Strahlung nur einen sehr geringen Bruchteil der Gesamtemission ausmacht, beginnt H_λ wieder zu wachsen und

[1]) Das Gasglühlicht, Leipzig, Veit u. Co., 1905.
[2]) Wied. Ann. 56, 433 (1896); J. f. G. u. W. 39, 160 und 425 (1896).
[3]) J. f. G. u. W. 39, 697 (1896); 40, 339 (1897); 46, 445 (1903).
[4]) Ebenda 41, 17 (1898); 44, 411 (1901); 47, 1011 (1904).
[5]) C. R. 126, 1861 (1898); J. f. G. u. W. 41, 733 (1898).
[6]) J. f. G. u. W. 44, 412 (1901); Phys. Z. 1, 289 (1899/1900).
[7]) J. f. G. u. W. 49, 25 (1906).

wird schließlich nahezu 1 (0,81 bei $\lambda = 18\,\mu$). Wegen des geringen H_λ zwischen 1 und 5 μ wird der Wärmeverlust des Strumpfes durch Ausstrahlung auf ein geringes Maß reduziert. Infolgedessen findet das Wärmegleichgewicht bei der hohen Temperatur von etwa 1800° abs. statt, und es sind nahezu 2 Proz. der Gesamtstrahlung sichtbar, gegen einige Promille für den gleichtemperierten schwarzen Körper.

Ferner untersuchte Rubens, welche Rolle die beiden Bestandteile der Strumpfmasse spielen. Beim reinen Thoroxyd fällt das ganze sichtbare Spektrum fort, und das kurzwellige Ultrarot ist sehr schwach, erst für große λ ist H_λ wie beim Auerstrumpf groß. Beim reinen Ceroxyd ist H_λ überall beträchtlich, aber bei sehr kurzen und sehr langen Wellen außerordentlich viel größer als zwischen 1 und 8 μ. Man kann sich daher leicht denken, daß ein geringer Zusatz von Ce_2O_3 zu ThO_2 genügt, um das gewünschte hohe H_λ im sichtbaren Gebiet hervorzubringen, ohne daß H_λ zwischen 1 und 8 μ wesentlich beeinflußt wird. In der Praxis hat sich bekanntlich ein Ceroxydgehalt von weniger als 1 Proz. als am günstigsten erwiesen.

Das Ceroxyd spielt hier also eine ähnliche Rolle wie ein Sensibilisator in einer photographischen Platte, indem es an einer gewünschten Stelle des Spektrums einen Absorptionsstreifen hervorbringt, ohne die übrigen Spektralgebiete zu beeinflussen. Jedoch erfüllt das Ceroxyd diese Bedingung nur mangelhaft. Wenn es gelänge, eine andere Substanz als Färbungsmittel zu verwenden, welche den Thoroxydstrumpf nicht nur im kurzwelligen Teile des sichtbaren Spektrums, sondern auch im Gelb und Rot vollkommen schwärzt, ohne auf das ultrarote Gebiet einzuwirken, so würde sich nach Rubens hierdurch der Lichteffekt des Gasglühlichtbrenners ungefähr verdreifachen lassen.

Über Abbrennen, Formen und Härten roher Glühkörper s. § 158.

Die Form des Glühkörpers ist von wesentlichem Einfluß; sie muß sich der Gestalt der Bunsenflamme möglichst anpassen, damit sich der Glühkörper stets in der heißesten Zone befindet. Ein gut gehärteter Glühkörper behält seine Form bei. Auch die Güte und Form des Gewebes spielt eine Rolle (Baumwolle, Ramie, Kollodiumseide). Die durch Eintauchen in Kollodiumlösungen versandfähig gemachten Glühkörper büßen häufig an Lichtstärke ein. Die Brenner sind zuweilen mit Regulierdüsen versehen, durch welche sich der Gasverbrauch verändern läßt. Solche Regulierdüsen sind zwar bequem, vermindern aber oft die Lichtstärke, und zwar infolge von unrichtiger Mischung von Luft und Gas. Zur Erzielung einer richtigen Mischung von Luft und Gas ist das Brennerrohr (Düsenrohr) zuweilen (z. B. bei vielen Starklichtbrennern) mit einer Luftreguliervorrichtung versehen, durch welche die Lufteinströmungsöffnungen nach Bedarf vergrößert oder verkleinert werden können. Bei zu kleinen Konsumen leistet eine Luftregulierung wesentliche Dienste.

α) Brenner mit aufrecht stehendem Glühkörper.

Brennerarten. Man unterscheidet vier Arten:

Normalbrenner; Konsum $\mathfrak{C}$ = 100 bis 150 Liter; Aufhängehöhe (Abstand des Glühkörperkopfes von der Brenneroberkante) h = 65 bis 80 mm.

Liliput- oder Juwelbrenner; $\mathfrak{C}$ = 60 bis 80 Liter; h = etwa 60 mm.

Starklichtbrenner; $\mathfrak{C}$ = 200 bis 400 Liter; h = 100 bis 140 mm.

Intensivbrenner; $\mathfrak{C}$ = 300 bis 1400 Liter.

Außer den gewöhnlichen geraden Zylindern gelangen, besonders bei den Starklichtbrennern, Lochzylinder zur Anwendung.

Fig. 173.

Normalbrenner. Die räumliche Lichtverteilung einer Lampe ohne Schirm und mit einem Albatringlasschirm ist aus den Kurven a und b, Fig. 173, ersichtlich. Die nackte Lampe besitzt also in der Horizontalen, die armierte Lampe in der nach unten gehenden Vertikalen die größte Lichtstärke.

Für die nackte Lampe ergibt sich im Mittel

$$J_s / J_m = 0{,}74 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Der spezifische Verbrauch. Um einen Überblick über die Leistungsfähigkeit der in Deutschland gebräuchlichsten Glühkörper zu gewinnen, haben 1900 und 1901 die Reichsanstalt und der Deutsche Verein von Gas- und Wasserfachmännern, der sich jedesmal mit mehreren an verschiedenen Orten befindlichen Beobachtern beteiligte, vergleichende Untersuchungen an Glühkörpern angestellt, welche von Vertrauensleuten aus den betreffenden Geschäften unter der Hand als Prima-Ware bezogen waren und deshalb als gute Handelsware anzusehen sind. 1900 gelangten fünf Sorten (A bis E) der bedeutendsten Firmen, 1901 sechs Sorten (F bis L) von minder großen Firmen zur Prüfung.

Der Gasdruck betrug 30 bis 35 mm Wasser, der stündliche Gasverbrauch $\mathfrak{C}$ zwischen 100 und 125 Liter. Unter Einhaltung dieser Grenzen wurde der Glühkörper, dessen Aufhängehöhe 70 mm betrug, durch allmähliches Aufbohren der Düse oder mittels einer Düse, welche aus einem Satze von fünf bis sechs Düsensorten mit verschieden weiten Bohrungen ausgewählt wurde, zu Anfang auf die größte Lichtstärke gebracht. Sodann wurde der Glühkörper unter Benutzung seiner Düse in eine Dauerprüfung bis zu 300 Brennstunden mit photometrischen Messungen nach 24, 100 und 300 Stunden genommen.

1900 wurde jede dieser Messungen sowohl bei dem Drucke der Anfangsprüfung als auch bei der größten Lichtstärke (durch Regulieren mittels des Hahnes) ausgeführt. 1901 wurde nach 24 und 100 Brennstunden nur beim Drucke der Anfangsprüfung, nach 300 Brennstunden außerdem noch bei größter Lichtstärke gemessen. Von der Reichsanstalt wurde die Dauerprüfung bis zu 600 Brennstunden ausgedehnt. Nachstehende Tabelle enthält das Endergebnis dieser Prüfungen, über deren ersten Teil Verfasser[1]) berichtet hat.

Sorten	Im Durchschnitt von 300 Brennstunden		J_m		
			zu Anfang	nach 300 Brennstunden kleiner als	
	J_m HK	$\mathfrak{G}_m$ Liter	HK	zu Anfang Proz.	nach 24 Brennstd. Proz.
A bis *E* . .	70	1,7	84	23	20
F „ *L* . .	70	1,8	99	39	29

Die Glühkörper *F* bis *L* besaßen also eine größere Anfangslichtstärke, aber eine geringere Konstanz als *A* bis *E*. Die Sorte *C* zeichnete sich sowohl durch eine relativ hohe wie namentlich durch eine sehr konstant bleibende Lichtstärke aus; es war nämlich nach 1 bzw. 24, 100, 300 Brennstunden $J_m = 86$ bzw. 85, 79, 76 HK.

Bei den von der Reichsanstalt untersuchten Glühkörpern hatte die Lichtstärke nach 600 Brennstunden für *A* bis *E* um 6, für *F* bis *L* um 12 Proz. gegen die Lichtstärke nach 300 Brennstunden abgenommen. Speziell für *C* betrug diese Abnahme nur 4 Proz.

Seit jener Zeit hat die Glühlampenindustrie noch weitere Fortschritte gemacht. Es wurden nämlich von der Reichsanstalt Glühkörper geprüft, welche eine noch höhere Anfangslichtstärke besaßen, in den ersten 200 Brennstunden um 7 Proz. in der Lichtstärke zunahmen und sich dann bis zu 2000 Brennstunden konstant hielten; bei ihnen war $\mathfrak{G}_m = 1,3$ bis 1,4 Liter.

Von einem guten Gasglühlichtapparat kann man demnach beanspruchen

$$\mathfrak{G}_s = 1,4/0,74 = 1,9 \text{ Liter.}$$

Neben den photometrischen Messungen von 1900 wurde noch das zu den Versuchen benutzte Leuchtgas mittels eines Hohlkopfbrenners (Schnittbrenners) bei einem stündlichen Verbrauch von 150 Liter auf Lichtstärke, sowie mittels eines Junkersschen Kalorimeters (S. 320) auf Heizwert geprüft. Dabei wurde von den einzelnen Beobachtern die Lichtstärke zwischen 8,2 und 14,3 HK, der Heizwert zwischen 4837 und 5450 Kal. gefunden. Da nun die von den verschiedenen Beob-

[1]) J. f. G. u. W. 43, 665 (1900).

achtungsstellen gefundenen Lichtstärkenwerte für das Gasglühlicht nur verhältnismäßig wenig voneinander abweichen, so scheint hieraus hervorzugehen, daß nicht die Lichtstärke des Gases, sondern sein Heizwert für die Gasglühlichttechnik von Bedeutung ist. Zu demselben Schlusse gelangen White, Russel und Fraser. Nach Lewes[1]) braucht ein Fallen des Heizwertes keineswegs ein Fallen der Lichtstärke des Gasglühlichtbrenners im Gefolge zu haben; für das wesentlichste Moment hält er die Flammentemperatur.

Liliput- oder Juwelbrenner. Sie sind im allgemeinen weniger ökonomisch (zu Anfang $\mathfrak{C}_m$ = etwa 1,6 Liter), gestatten indessen eine bessere Teilung des Lichtes als die normalen Brenner.

Starklichtbrenner. Sie sind im wesentlichen nichts anderes als vergrößerte Brenner der üblichen Konstruktion und lassen sich ohne weiteres an Stelle der letzteren aufschrauben. Bei den in der Reichsanstalt geprüften Brennern war

$\mathfrak{C}_m$ = 1,1 bis 1,7 Liter; J_m = 150 bis 250 HK;
so daß $\mathfrak{C}_s$ = 1,5 „ 2,3 „ J_s = 110 „ 185 „

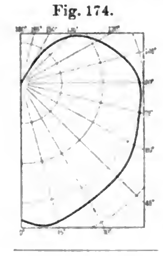
Intensivbrenner. Zur Erzielung einer höheren Lichtstärke ist bei diesen Lampen, die als Ersatz für Bogenlampen bestimmt sind, ein neues Konstruktionsprinzip hinzugenommen. Beispielsweise wird das Leuchtgas gepreßt (Milleniumlicht usw.) oder es wird die Luft- und Leuchtgasmischung gepreßt (Selaslicht usw.), oder es wird mittels eines Schornsteines ein starker Luftzug erzeugt (Lucaslampe). Bei den Messungen in der Reichsanstalt war

$\mathfrak{C}_m$ = 0,8 bis 1,5 Liter; J_m = 200 bis 1100 HK;
so daß $\mathfrak{C}_s$ = 1,1 „ 2,0 „ J_s = 150 „ 810 „

In der Praxis hat man es häufig mit noch größeren Lichtstärken zu tun; so findet z. B. Drehschmidt[2]) in maximo J_m = 1800 HK bei $\mathfrak{C}_m$ = 0,8 Liter.

β) Brenner mit hängendem Glühkörper.

Fig. 174.



Die Lampen sind mit einem oder mehreren Glühkörpern versehen, welche bei einem Gasdruck von etwa 40 mm Wasser je etwa 70 bis 110 Liter stündlich verbrauchen.

Die räumliche Lichtverteilung einer Lampe mit Glühkörpern von der bisher gebräuchlichen Form zeigt Fig. 174. Die Lampe besitzt also die größte Lichtstärke in der Nähe der nach unten gehenden Vertikalen. Neuerdings wurden in der Reichsanstalt Lampen untersucht, bei denen das Maximum sehr nahe der Horizontalen lag;

[1]) Vgl. J. f. G. u. W. **46**, 970 (1903).
[2]) Ebenda **45**, 873 (1902); **46**, 758 (1903).

die Glühkörper dieser Lampen waren anscheinend länger als die früheren. Im Mittel ist in beiden Fällen

$$J_s/J_m = 0{,}82 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Der spezifische Verbrauch ist

$$\mathfrak{C}_s = 1{,}2 \text{ bis } 2{,}1 \text{ Liter.}$$

b) Acetylenbrenner.

Die Beleuchtung mittels Acetylens konnte erst in den Wettbewerb eintreten, als es gelungen war, Calciumkarbid durch Zusammenschmelzen von Ätzkalk und Kohle herzustellen. Durch Berührung von Calciumkarbid mit Wasser entwickelt sich Acetylen, und zwar gibt 1 kg Karbid in reinem Zustande 350 Liter, dagegen wenn es nicht ganz frisch und nicht völlig von der Luft abgeschlossen ist, etwa 300 Liter Acetylen. Das Acetylen besitzt das spezifische Gewicht 0,91 (Leuchtgas durchschnittlich 0,40).

1. Gewöhnliche Brenner.

Zur Vermeidung des Verrußens muß man für erhöhte Luftzufuhr und Kalthalten der sehr engen Gasausströmungsöffnungen sorgen. Der Gasdruck liegt gewöhnlich zwischen 80 und 200 mm Wasser.

Die Temperatur der Acetylenflamme liegt nach Stewart[1]) zwischen 2700 und 3000° abs.; G. Schulze findet sie zu 2420° abs.; vergleichsweise sei angeführt, daß die Temperatur der Kerzenflamme nach Kurlbaum[2]) 1700° abs. beträgt.

Die räumliche Lichtverteilung ist dieselbe wie bei den unter a) 1. angeführten Brennern.

Der spezifische Verbrauch. Es ist

$\mathfrak{C}_s$ im günstigsten Falle gleich 0,6 Liter, im Mittel gleich 1,0 Liter.

2. Glühlichtbrenner.

Bei der Herstellung hat man zu beachten, daß die Flamme eine große Neigung zum Zurückschlagen hat.

Die räumliche Lichtverteilung ist dieselbe wie beim gewöhnlichen Gasglühlicht.

Der spezifische Verbrauch bei den in der Reichsanstalt geprüften Lampen war

$\mathfrak{C}_m = 0{,}27$ bis 0,37 Liter, so daß $\mathfrak{C}_s = 0{,}36$ bis 0,50 Liter.

Lichtverlust durch Armaturen. Die mitgeteilten Zahlen für J_m, J_s, $\mathfrak{C}_m$ und $\mathfrak{C}_s$ beziehen sich, wie S. 328 angegeben ist, auf nackte

[1]) Phys. Review 13, 257 (1901).
[2]) Phys. Z. 3, 187 (1901/02).

Lampen. Wenn die Brenner mit aufrecht stehendem Glühkörper, wie es bei der Beleuchtung im Freien gewöhnlich geschieht, in ein pyramidenförmiges, nach oben sich erweiterndes Gehäuse mit Klarglasfenstern eingeschlossen sind (Straßenlaternen), wird J_s um 15 bis 20 Proz. kleiner, also $\mathfrak{E}_s$ um 18 bis 25 Proz. größer. Brenner mit hängendem Glühkörper werden im Freien vielfach mit einer Klarglasglocke versehen; der Lichtverlust beträgt dann etwa 6 Proz. Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Armaturen genügenden Luftzutritt gestatten. Vgl. S. 344 Zeile 10 von oben.

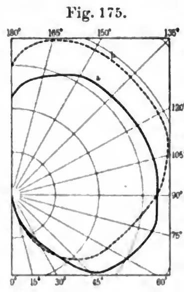
§ 151. Lampen mit flüssigem Brennstoff.

a) Gewöhnliche Petroleumlampen.

Die Flachbrenner sind zu wenig wirtschaftlich und sollen hier deshalb beiseite gelassen werden. Die Rundbrenner zerfallen in solche ohne und mit Brennscheibe. Die letzteren besitzen ausgebauchte Zylinder. Die Zylinder der Lampen ohne Brennscheibe sind mit einer Einschnürung versehen; sie sind entweder glatt oder erweitern sich oberhalb der Einschnürung konisch (Reformzylinder).

Die Lichtstärke der Brenner mit Brennscheibe nimmt infolge des stärkeren Verkohlens des Dochtes während des Brennens allmählich ab. Bei den Brennern ohne Brennscheibe hält sich die Lichtstärke im allgemeinen, solange noch etwas Flüssigkeit im Behälter vorhanden ist, nahezu konstant, so daß sich diese Lampen, falls keine elektrischen Glühlampen zur Verfügung stehen, als Zwischenlichtquellen (s. S. 152) eignen. Vorausgesetzt wird hierbei, daß der Docht vor jedem photometrischen Versuch glatt abgeschnitten und von Zeit zu Zeit durch einen neuen, gut getrockneten ersetzt wird. Am günstigsten ist es, die Lampe etwa 20 Minuten nach dem Anzünden durch Verstellen des Dochtes auf die höchste zu erreichende Lichtstärke zu bringen, so daß sie gerade vor dem Rußen steht. Sollten sich an einer Stelle längere, rußbildende Zacken bilden, so hat man den Zylinder abzunehmen und den Docht an der betreffenden Stelle etwas abzuschneiden oder einzudrücken.

Fig. 175.



Die räumlichen Lichtverteilungskurven *a* und *b*, Fig. 175, beziehen sich auf Lampen ohne und mit Brennscheibe. Für diese ist durchschnittlich $J_s/J_m = 0{,}87$ bzw. $0{,}90$. Als Mittelwert aus beiden ergibt sich demnach

$$J_s/J_m = 0{,}88.$$

Der *spezifische Verbrauch* beträgt für die neueren Lampen ohne und mit Brennscheibe für gutes amerikanisches, galizisches und russisches Petroleum durchschnittlich

$$\mathfrak{C}_m = 3{,}0\,\text{g}, \text{ so daß } \mathfrak{C}_s = 3{,}4\,\text{g}.$$

Die 6'''- und 10'''-Lampen ohne Brennscheibe sind zuweilen etwas günstiger als die entsprechenden zu 14'''; die letzteren geben im Mittel $J_m = 16$ HK. Für Petroleum, welches spezifisch schwerer als russisches (0,81 bei 15°) ist, sind Lampen mit Brennscheibe günstiger als solche ohne Brennscheibe.

b) Petroleumglühlichtlampen.

Es sind im wesentlichen zwei Arten in Gebrauch. Die Lampen der *ersteren* Art, bei welchen der Brennstoff wie bei den gewöhnlichen Petroleumlampen durch einen Docht zur Flamme emporgeführt wird, sind mit besonders gestalteten Brennscheiben, Brennerkappen und dergleichen versehen. Durch diese wird ein verstärkter Luftzug erzeugt, so daß unmittelbar eine Bunsenflamme entsteht. Die Lampen erfordern eine sehr sorgfältige Behandlung; der Docht muß sehr glatt abgeschnitten sein, weil sonst kleine, weiße Flämmchen entstehen, welche den Glühkörper berußen. Es ergab sich in der Reichsanstalt

$$\mathfrak{C}_m = 0{,}8 \text{ bis } 1{,}8\,\text{g};\ J_m = 30 \text{ bis } 70 \text{ HK},$$

so daß $\mathfrak{C}_s = 1{,}1$ „ 2,4 „; $J_s = 20$ „ 50 „ .

Bei den Lampen der *zweiten* Art wird durch die Saugfähigkeit eines Dochtes oder durch den hydrostatischen Druck des in einem hochliegenden Gefäß befindlichen Flüssigkeitsbehälters oder durch Preßluft (mittels Luftpumpe oder durch die Expansionskraft einer abgeschlossenen, durch die Flamme erhitzten Luftmenge oder auf andere Weise) oder durch den Druck von flüssiger Kohlensäure usw. der Brennstoff einem besonderen, in unmittelbarer Nähe des Glühkörpers angeordneten Behälter, dem sogenannten *Vergaser*, zugeführt und dort durch eine immerwährende Hilfsflamme vergast, oder es wird die Vergasung durch eine Hilfsflamme eingeleitet, welche nachher von selbst erlischt oder entfernt wird. Es wurde in der Reichsanstalt gefunden

$$\mathfrak{C}_m = 0{,}4 \text{ bis } 1{,}5\,\text{g};\ J_m = 100 \text{ bis } 660 \text{ HK},$$

so daß $\mathfrak{C}_s = 0{,}6$ „ 2,0 „; $J_s = 75$ „ 490 „ .

c) Spiritusglühlichtlampen.

Es sind jetzt fast nur Vergaserlampen im Gebrauch. Das Prinzip ist dasselbe wie bei den Petroleumlampen. Messungen in der Reichsanstalt ergaben

$$\mathfrak{C}_m = 0{,}9 \text{ bis } 2{,}5\,\text{g};\ J_m = 16 \text{ bis } 550 \text{ HK},$$

so daß $\mathfrak{C}_s = 1{,}2$ „ 3,3 „; $J_s = 12$ „ 400 „ .

Eine bis zu 500 Brennstunden ausgedehnte Dauerprüfung von 14 Lampensorten mit je drei Stück, welche der Reichsanstalt anläßlich eines Preisausschreibens eingesandt waren, ergab insofern ein günstiges Resultat, als eine Anzahl Lampen die Prüfung ohne wesentliche Eingriffe durchmachten.

Lichtverlust durch Armaturen. Vgl. S. 357.

§ 152. Vergleich zwischen den verschiedenen Lichtquellen in wirtschaftlicher Hinsicht usw.[1]

In Tabelle IX im Anhang sind eine Reihe von Lichtquellen miteinander verglichen und nach ihrer Billigkeit (Spalte 6) geordnet. Die mitgeteilten Zahlen gelten für nackte Lampen und bei Bogenlampen ohne Berücksichtigung des Vorschaltwiderstandes. Wegen Lichtverlust durch Armaturen s. S. 344 und 357.

Aus den Zahlen der Spalte 3 läßt sich der bedeutende Fortschritt für die einzelnen Lampenarten erkennen. Beispielsweise ist $\mathfrak{C}_s$ für Bogenlampen durch Einführung der Quecksilberlampen von 1,0 auf 0,27 Watt, für elektrische Glühlampen durch Einführung der Metallfadenlampen von 3,4 auf 1,4 Watt, für Petroleumlampen durch Einführung der Glühlichtlampen von 3,4 auf 1,2 g herabgemindert.

Die Zahlen in Spalte 4 und 5 zeigen, daß die elektrischen Lampen bessere Apparate zur Umwandlung von Energie in Licht sind als die auf einem Verbrennungsprozeß beruhenden. Sogar die bei den elektrischen Lampen an letzter Stelle stehende gewöhnliche Kohlenfadenlampe ist hierin dem stehenden Gasglühlicht noch dreimal überlegen.

Was die Zahlen in Spalte 6 anbelangt, so ist bemerkenswert, daß hier das Gasglühlicht mit an der Spitze steht und bei weitem die Kohlenfadenlampe übertrifft; es kommt dies daher, daß die Betriebskosten zur Erzeugung des elektrischen Stromes jetzt noch sehr große sind.

Die Reihenfolge ist jedoch sehr willkürlich, wie folgende Beispiele erläutern. Der Preis für 1 cbm Leuchtgas beträgt in kleinen Städten 18 Pfg. Das elektrische Licht wird wesentlich billiger, wenn man den Strom selbst erzeugt. Bei größeren Anlagen kann der Preis für die Kilowattstunde bis auf 10 bis 15 Pfg., bei kleineren auf 20 bis 25 Pfg. herabgemindert werden. Wenn 1 Kilowattstunde 10 Pfg. kostet, kann schon die Kohlenfadenlampe mit dem Gasglühlicht nahezu konkurrieren.

Beim Vergleich sind ferner die Kosten für die Anschaffung und Erneuerung der Lampen usw. außer acht gelassen. Berücksichtigt man diese, so ändert sich die Reihenfolge wieder. Sie wird aber vollständig über den Haufen geworfen, wenn man auch noch den Zweck,

[1] Vgl. Lummer, Ziele der Leuchttechnik (Anm. 3, S. 53); Wedding, Die praktische Bedeutung der gebräuchlichsten Lichtquellen; J. f. G. u. W. **48**, 105 (1905).

dem eine Lichtquelle dienen soll, in Betracht zieht. Alsdann sind noch eine Anzahl von Faktoren zu berücksichtigen, die bald in dem einen, bald in dem anderen Fall, bald einzeln, bald zu mehreren auftreten. Dieselben betreffen: die absolute Größe der Lichtstärke, die räumliche Lichtverteilung, die Ruhe des Lichtes, die Farbe des Lichtes, die (den Zahlen in Spalte 5 proportionale) Wärmeentwickelung, die Kohlensäureentwickelung und die Einfachheit der Bedienung. Beispielsweise können für unsere gewöhnliche Zimmerbeleuchtung die großen Bogenlampen mit ihrem relativ geringen $\mathfrak{C}_s$ überhaupt nicht in Betracht kommen, und wenn man sanitäre Rücksichten zu nehmen hat, wird man dem relativ kostspieligen elektrischem Glühlicht den Vorzug vor dem billigeren Gasglühlicht geben.

Vorstehendes soll nur einen Fingerzeig für die Beantwortung der hier auftretenden Fragen bieten. In erschöpfender und allgemein verständlicher Weise behandelt Wedding an der eingangs erwähnten Stelle alle für den Vergleich der verschiedenen Lampenarten in Betracht kommenden Faktoren.

Elftes Kapitel.

Verteilung der Beleuchtung.

§ 153. Bestimmung der Beleuchtung aus Lichtstärkenwerten.

Im früheren haben wir Apparate kennen gelernt, welche die Beleuchtung unmittelbar zu messen gestatten. Im folgenden wollen wir uns mit der Bestimmung der Beleuchtung aus den beobachteten Lichtstärkenwerten beschäftigen.

a) Definitionen.

In Fig. 176 sei L die Lichtquelle, A der Fußpunkt des L tragenden Kandelabers, d. h. der senkrecht unter L liegende Punkt der Horizontalebene AX; O ein beliebiger Punkt von AX. Bezeichnet man (s. Fig. 176a)

> die Lichtstärke von L in Richtung LO mit J, die Kandelaberhöhe AL mit h, den Seitenabstand AO mit x, den Ausstrahlungswinkel ALO (die Poldistanz, S. 269) mit ϑ, die Entfernung LO mit r,

so ist die Beleuchtung E_h der Horizontalebene im Punkte O

$$E_h = J \cos\vartheta / r^2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

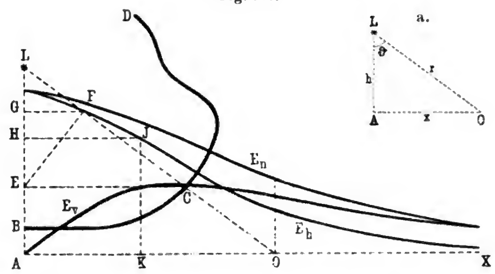
Hierfür kann man, da

$$r = h/\cos\vartheta = \sqrt{h^2 + x^2} = x/\sin\vartheta$$

ist, auch schreiben

$$E_h = Jh/r^3;\ E_h = Jh/(h^2 + x^2)^{3/2} \text{ (Weber[1])} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\,a),\ 1\,b)$$
$$E_h = J\cos^3\vartheta/h^2;\ E_h = J\sin^2\vartheta\cos\vartheta/x^2 \text{ (Uppenborn[2])} \ . \quad 1\,c),\ 1\,d)$$

Fig. 176.



Ein in O normal zu LO gelegenes Flächenelement erhält die Beleuchtung

$$E_n = J/r^2 = J/(h^2 + x^2) = J\cos^2\vartheta/h^2 = J\sin^2\vartheta/x^2 \quad . \quad . \quad 2)$$

Ein in O senkrecht zur Richtung AO (der Projektion von LO auf AX) gelegenes vertikales Flächenelement erhält die Beleuchtung

$$\left.\begin{aligned} E_v &= J\sin\vartheta/r^2 = Jx/r^3 = Jx/(h^2 + x^2)^{3/2} \\ &= J\sin\vartheta\cos^2\vartheta/h^2 = J\sin^3\vartheta/x^2 \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Bildet das Lot des vertikalen Flächenelementes mit der Richtung OA den Winkel α, so ist die Beleuchtung auf diesem Flächenelemente

$$E_{v'} = J\sin\vartheta\cos\alpha/r^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Die Größen E_h und E_v nennt man die *horizontale* und *vertikale* Beleuchtung im Punkte O. Die Größe E_n ist die Maximalbeleuchtung; sie wird von Blondel[3]) und anderen als *normale* Beleuchtung (oder Normalbeleuchtung) im Punkte O, von Wybauw[4]) als *Nutzeffekt* bezeichnet.

Ist S ein Teil der Horizontalebene AX, ds ein Element von S am Orte O, und wird über alle Elemente von S integriert, so ist

---

[1]) E. T. Z. 6, 55 (1885).

[2]) Z. f. angew. Elektrizitätslehre 2, 380 (1880).

[3]) Génie civil 26, 279 (1894/95); Z. f. Bel. 2, 165 (1896). Dieser Literaturnachweis gilt auch für das folgende.

[4]) Bull. Soc. belge de l'électr. 2, 78 (1885). Diese Angabe bezieht sich gleichfalls auf das nachstehende.

α) der von L auf S gesandte Lichtstrom, das sogenannte Beleuchtungsvolumen nach Wybauwscher Bezeichnung,

$$\Phi = \int E_h\, ds, \qquad 5)$$

β) die *mittlere horizontale Beleuchtung* von S

$$E_m = \Phi / S \qquad 6)$$

γ) der *vollständige Nutzeffekt* nach Wybauwscher Bezeichnung

$$\mathfrak{E} = \int E_n\, ds \qquad 7)$$

b) Bestimmung von E_h, E_n und E_v.

1. Direkte Berechnung. Für gewöhnlich ist die Lage des Punktes O durch seinen Seitenabstand x und die Kandelaberhöhe h gegeben. Man kann dann unmittelbar Gleichung 1 b) und die ihr entsprechende Gleichung 2) und 3) anwenden. Um auch die ϑ enthaltenden Gleichungen benutzen zu können, hat man ϑ zu bestimmen aus

$$tg\,\vartheta = x/h \qquad 8)$$

In vielen Fällen ist die Lichtstärke in der speziellen Richtung LO nicht gegeben; wohl aber kennt man die mittleren Lichtstärken $J(\vartheta)$ unter einer größeren Anzahl von Poldistanzen ϑ. In diesem Falle zeichnet man die sich hieraus ergebende räumliche Lichtverteilungskurve direkt in die Fig. 176 ein und zieht die Linie LO, welche die Kurve in C schneidet. Alsdann stellt LC die gesuchte Lichtstärke in Richtung LO dar, so daß

$$J = LC/k, \qquad 9)$$

wenn LC in mm gemessen wird und als Maßstab [1]) 1 HK $= k$ mm gewählt ist. Oder man zeichnet die Lichtverteilungskurve auf einem besonderen Blatt auf und sucht die Lichtstärke unter dem sich aus Gleichung 8), bzw. Tabelle X im Anhang ergebenden Winkel ϑ.

Beispiel 1. Es sei gegeben $x = 7$ m; $h = 8$ m. Für L sei gefunden unter

$\vartheta =$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°
$J(\vartheta) =$	985	987	1026	967	806	662	306	73.

Aus der Lichtverteilungskurve erhält man $J = 990$ HK. Ferner ist $(h^2 + x^2) = 113$, mithin nach Gleichungen 1 b), 2) und 3)

$$E_h = 990 \cdot 8/113^{3/2} = 6{,}59 \text{ Lux}; \quad E_n = 990/113 = 8{,}76 \text{ Lux};$$
$$E_v = 990 \cdot 7/113^{3/2} = 5{,}77 \text{ Lux}.$$

Aus Gleichung 8) folgt $\vartheta = 41{,}19°$, so daß

$$E_h = 990\, cos^3\, 41{,}19/64 = 6{,}59 \text{ Lux usw.}$$

[1]) Wenn man zuverlässige Werte erhalten will, muß man k natürlich möglichst groß wählen. Der Maßstab in Fig. 176 ist viel zu klein.

2. **Berechnung mittels Tabellen.** Man berechnet unter der Annahme, daß L nach allen Richtungen die Lichtstärke 100 HK besitzt, nach Gleichung 1 b) die mit p zu bezeichnende horizontale Beleuchtung

$$p = 100\, h/(h^2 + x^2)^{3/2} \quad \ldots \ldots \quad 10)$$

für eine Reihe von Werten für h und x und stellt die Zahlen p in Tabellen zusammen. In nachstehender Tabelle sind Teile zweier solcher Tabellen mitgeteilt.

h in Metern	x in Metern										
	0	0,5	1	2	3	4	5	7	10	15	20
3	11,11	10,66	9,49	6,40	3,93	2,40	1,51	0,68	0,26	0,084	0,036
4	6,25	6,11	5,71	4,47	3,20	2,21	1,52	0,76	0,32	0,107	0,047

Man kann auch mit einer *einzigen* Tabelle, nämlich der für $h = 1$ m geltenden, auskommen. Dieselbe ist im Anhange unter Nr. XI mitgeteilt. In ihr ist der Seitenabstand mit x', die horizontale Beleuchtung mit p' bezeichnet, so daß

$$p' = 100/(1 + x'^2)^{3/2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11)$$

Man erhält dann für ein beliebiges x und ein beliebiges h den zugehörigen Wert p, indem man in der Tabelle XI den zu $x' = x/h$ gehörigen Wert p' aufsucht und diesen durch h^2 dividiert.

Beispiel 2. Es sei wieder $x = 7$ m, $h = 8$ m, $J = 990$ HK. Zu $x' = 7/8 = 0{,}88$ gehört $p' = 42{,}7$ Lux, so daß $p = 42{,}7/64 = 0{,}67$ Lux. Mithin ist für $J = 990$ HK

$$E_h = 0{,}67 \cdot 990/100 = 6{,}6 \text{ Lux}.$$

3. **Ermittelung mittels eines graphischen Verfahrens.** α) Man stellt die Zahlen p und p' anstatt in Tabellen in Kurven zusammen, d. h. man trägt in einem rechtwinkeligen Koordinatensystem die Werte x bzw. x' als Abszissen und die zugehörigen Werte p und p' als Ordinaten auf und verbindet die so erhaltenen Punkte durch eine Kurve.

β) Weber[1]) hat für die Größe p besondere Kurventafeln konstruiert und herausgegeben.

γ) (Maréchal[2]), Blondel). Man geht unmittelbar von der gegebenen Lichtquelle (also nicht von der in b 2) definierten) und von der gegebenen Höhe aus und zieht in Fig. 176 $CE \perp LA$, $EF \perp LC$ und $FG \perp LA$. Alsdann ist

$$LE = LC \cdot \cos\vartheta;\; LF = LE \cdot \cos\vartheta;\; LG = LF \cdot \cos\vartheta,$$
$$FG = LF \cdot \sin\vartheta,$$

[1]) Kurven zur Berechnung der von künstlichen Lichtquellen indizierten Helligkeit. Berlin, Jul. Springer, 1885.

[2]) L'Éclairage à Paris, Paris, Baudry & Co., 1894; Z. f. Bel. 1, 115 (1895). Diese Literaturnachweise gelten auch für das nachstehende.

mithin $LG = LC \cdot \cos^3 \vartheta$; $LF = LC \cdot \cos^2 \vartheta$; $FG = LC \cdot \sin \vartheta \cos^2 \vartheta$, demnach nach Gleichung 1c), 2) und 3)

$$E_h = \frac{LG}{k \cdot h^2};\ E_n = \frac{LF}{k \cdot h^2};\ E_v = \frac{FG}{k \cdot h^2}. \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Eine ähnliche, allerdings etwas kompliziertere Methode war schon vorher von Loppé [1]) angegeben.

Beispiel 3. Es werde das Zahlenmaterial von Beispiel 2 benutzt, und es sei bei der Konstruktion der Lichtverteilungskurve $k = 0{,}1$ (also 1 HK = 0,1 mm) angenommen. Alsdann ergibt sich

$LG = 42{,}2$ mm; $LF = 56{,}0$ mm; $FG = 36{,}9$ mm,
und hieraus durch Division mit $k \cdot h^2 = 6{,}4$
$E_h = 6{,}59$ Lux; $E_h = 8{,}75$ Lux; $E_v = 5{,}77$ Lux.

Anstatt LG usw. zunächst in Millimetern auszumessen und hieraus E_h usw. zu berechnen, kann man LG usw. direkt mit dem Maßstabe 1 Lux $= k \cdot h^2 = 6{,}4$ mm ausmessen und findet dann unmittelbar E_h usw. in Lux.

δ) Man bestimmt E_h, E_n und E_v nach dem vorigen (oder einem der früher angegebenen) Verfahren für eine Reihe von Punkten O der

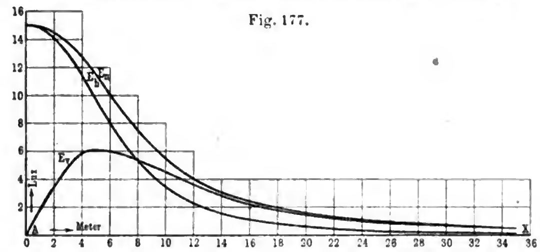


Fig. 177.

Horizontalebene AX, trägt sodann, wie in Fig. 176 angegeben, in diesen Punkten senkrecht zu AX die entsprechenden Werte auf und verbindet die Endpunkte durch Kurven. Diese Kurven nennt man *Beleuchtungskurven.* Fig. 177 zeigt die Beleuchtungskurven für E_h, E_n und E_v, welche sich für die im Beispiel 1 angegebene Lichtverteilung und für $h = 8$ m ergeben.

Aus diesen für die gegebene Lichtquelle und die gegebene Höhe h [2]) gültigen Beleuchtungskurven kann man dann die zu einem gegebenen

[1]) L'Électricien **14**, 936 (1890).

[2]) Von einzelnen Autoren werden die Beleuchtungskurven nur $h = 1$ m konstruiert. Eine einfache Veränderung der Maßstäbe gestattet nämlich, an diesen Kurven die Beleuchtungen für eine beliebige Höhe h abzulesen. Man braucht dazu nur den Maßstab für die Abszissen h mal zu verkleinern und den Maßstab für die Ordinaten h^2 mal zu vergrößern.

Seitenabstande x gehörigen Beleuchtungen unmittelbar als die zur Abszisse x gehörigen Ordinaten entnehmen. Ist umgekehrt die Beleuchtung, z. B. $E_h = a$, gegeben, so trägt man auf AL (Fig. 176) $AH = a$ ab, zieht durch H zu AX eine Parallele, welche die Kurve für E_h in J schneidet und zieht $JK \perp AX$. Dann ist AK der zur Beleuchtung a gehörige Seitenabstand x.

Man kann so also die Seitenabstände x_1, x_2, x_3 ... bestimmen, in welchen E_h oder E_n oder E_v gleich 1, 2, 3 ... Lux ist. Schlägt man um den Fußpunkt A in der Horizontalebene AX mit diesen Seitenabständen als Radien Kreise, so sind die Umfänge derselben unter der Annahme, daß das Licht symmetrisch um die Vertikale LA verteilt ist, die Orte aller Punkte, in welchen die Beleuchtung 1, 2, 3 ... Lux ist. Kurven gleicher Beleuchtung werden *Isoluxkurven* genannt. Die erwähnten Kreisbögen sind unter der gemachten Annahme also Isoluxkurven.

Anwendung auf mehrere Lichtquellen. Nach Gleichung 1), S. 92 ist die durch mehrere Lichtquellen L', L'' ... auf einem beliebig gelegenen Flächenelement erzeugte Beleuchtung gleich der Summe der von den einzelnen Lichtquellen erzeugten Beleuchtungen. Hier interessieren uns am meisten horizontale Elemente.

Die durch mehrere Lichtquellen erzeugte maximale Beleuchtung ist dagegen nicht gleich der Summe der von den einzelnen Lichtquellen erzeugten maximalen — normalen, Gleichung 2) — Beleuchtungen [1]). Bei zwei Lichtquellen L' und L'' erhält man die Verteilung der horizontalen Beleuchtung in der Verbindungslinie $A'A''$ ihrer Fußpunkte durch graphische Addition der beiden horizontalen Beleuchtungskurven.

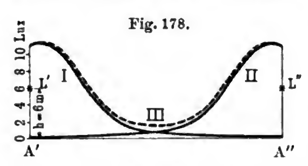


Fig. 178.

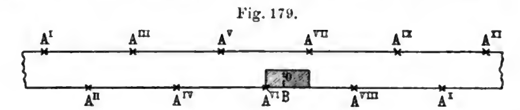
Beispiel 4. Die beiden identischen Lichtquellen L' und L'' sollen die horizontalen Beleuchtungskurven I und II (Fig. 178) besitzen. Alsdann ist die gestrichelte Kurve III die resultierende horizontale Beleuchtungskurve längs $A'A''$. In der Mitte zwischen A' und A'' wird also die gesamte horizontale Beleuchtung verdoppelt, während sie in der Nähe von A' und A'' nur unmerklich zunimmt.

Beispiel 5. Eine Reihe unter sich identischer, in der Höhe $h = 8$ m über dem Straßendamm aufgehängter Lichtquellen L^{I}, L^{II} ... L^{XI} (Fig. 179), welche durch die Werte $J(\vartheta)$ in Beispiel 1 gegeben sind, sei zu beiden Seiten einer 20 m breiten, horizontalen Straße abwechselnd, d. h. so aufgestellt, daß eine Lampe immer der Mitte

[1]) Liebenthal, E. T. Z. **10**, 337 (1889); J. f. G. u. W. **32**, 687 (1889).

von zwei benachbarten Lampen auf der entgegengesetzten Seite gegenübersteht. Der Lampenabstand auf jeder Straßenseite soll 48 m betragen. Es soll die gesamte horizontale Beleuchtung $\sum E_h$ eines im

Fig. 179.



mittleren Teile des Straßendammes liegenden Punktes O bestimmt werden. Die Lage von O sei gegeben durch $A^{VI}B = 10$ m; $OB = 8$ m, wo $OB \perp A^{VI}A^{X}$.

Man mißt (bzw. berechnet mittels des Pythagoras) die Abstände OA^{I}, $OA^{II}\ldots$, entnimmt aus der Kurve E_h von Fig. 177 (bzw. für größere x, aus in größerem Maßstabe fortgesetzten Kurven) die zugehörigen horizontalen Beleuchtungen und addiert dieselben. Man findet so die Zahlen der nachstehenden Tabelle.

Fußpunkt der Lichtquelle	Abstand des Fußpunktes von O	Horizontale Beleuchtung
A^{I}	131	0,001
A^{III}	83	0,007
A^{V}	36	0,102
A^{VII}	18,4	0,735
A^{IX}	63	0,017
A^{XI}	111	0,002
A^{II}	106	0,003
A^{IV}	59	0,021
A^{VI}	12,8	1,93
A^{VIII}	39	0,082
A^{X}	86	0,006
$\sum E_h$	—	2,906

Die vier O zunächst liegenden Lichtquellen L^{V}, L^{VI}, L^{VII} und L^{VIII} geben zusammen 2,849, also einen um nur 2 Proz. kleineren Betrag. Die Einbeziehung der übrigen entfernteren Lichtquellen ändert das Ergebnis nur unmerklich. Ebenso genügt es im allgemeinen, zur Bestimmung von $\sum E_h$ nur zwei bis vier benachbarte Lichtquellen zu berücksichtigen.

Um ein übersichtliches Bild über die durch eine Reihe von Lichtquellen erzielte horizontale Beleuchtung zu erhalten, empfiehlt es sich, für eine größere Anzahl von Punkten des Straßendammes $\sum E_h$ zu ermitteln und hieraus durch Interpolation die resultierenden Isolux-

kurven zu bestimmen, ähnlich wie man auf Wetterkarten die Isobaren zieht. Maréchal sowie Lux [1]) konstruieren für jede einzelne Lichtquelle die kreisförmige Isoluxkurve und leiten aus dieser durch Auswertung der Schnittpunkte die resultierenden Isoluxkurven ab.

Beispiel 6. Es sollen die Daten von Beispiel 5 zugrunde gelegt werden. In diesem Falle, wo die Lichtquellen symmetrisch aufgestellt sind, braucht man nur die Beleuchtung innerhalb des in Fig. 179 schraffierten Rechteckes zu bestimmen, dessen Seiten gleich dem halben Lampenabstande und der halben Breite der Straße sind.

Fig. 180.

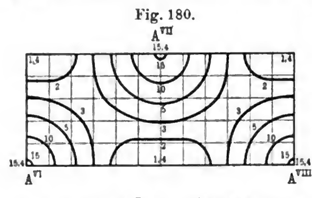


Fig. 180 zeigt die sich ergebenden Isoluxkurven von 15, 10, 5, 3 und 2 Lux. Hierbei wurden die Werte $\sum E_h$ für die Eckpunkte der Quadrate von je 2 m Seite berechnet, in welche sich das schraffierte Rechteck zerlegen läßt. Unmittelbar unterhalb der Kandelaber ist $\sum E_h = 15,4$ Lux; es ist dies die größte Beleuchtung (E_{max}). Die Isoluxkurven von 15, 10, 5 und 3 Lux sind nahezu Kreisbögen um die Fußpunkte der Lampen; ihre Radien sind etwa 1 bzw. 5, 9 und 12 m. Die Isoluxkurven von 2 Lux sind ovalförmig; sie sind symmetrisch zu den Mittelsenkrechten der Linien $A^{V}A^{VII}$, $A^{VI}A^{VIII}$, $A^{VII}A^{IX}\ldots$, also symmetrisch zu den Mittelsenkrechten der Linien angeordnet, welche die Fußpunkte der benachbarten Lichtquellen jeder Straßenseite verbinden; ihre größten bzw. kleinsten Achsen betragen etwa 9 bzw. 4,5 m. Die geringste Beleuchtung (E_{min}) beträgt 1,4 Lux; dieses Minimum ist an den Straßenseiten, und zwar in der Mitte der genannten Verbindungslinien, demnach gerade gegenüber den Lichtquellen der anderen Straßenseite vorhanden. Die horizontale Beleuchtung schwankt also zwischen 15,4 und 1,4 Lux; sie ist mithin recht ungleichmäßig. Immerhin ist sie, was die Sicherheit des Verkehrs anbelangt, als eine ausreichende zu bezeichnen, wenn man nach Wybauw 1 Lux als Beleuchtungsminimum für lebhaftere Straßen zuläßt.

Wir hatten bisher nur die horizontale Beleuchtung des Straßendammes (Bodenbeleuchtung) bestimmt. Zuweilen wünscht man auch die Beleuchtung von horizontalen, in Augenhöhe (etwa 1,5 m über dem Straßendamm) liegenden Flächen zu kennen. Die Berechnung wird in derselben Weise wie bisher ausgeführt, nur daß dann die Höhe über der zu beleuchtenden Horizontalebene gleich 6,5 (statt 8) m wird.

---

[1]) Die öffentliche Beleuchtung von Berlin usw. Berlin, S. Fischer, 1896; Z. f. Bel. 2, 257 (1896). Diese Literaturnachweise gelten auch für das folgende.

c) Bestimmung von Φ, E_m und $\mathfrak{E}$ (S. 363).

Mit einer für die Zwecke der Praxis im allgemeinen ausreichenden Genauigkeit findet man nach Bloch [1]) die durch Gl. 6), S. 363 definierte mittlere horizontale Beleuchtung E_m der durch die eine Lichtquelle L (Fig. 176) beleuchteten, in der Horizontalebene AX liegenden Fläche S, wenn man diese Fläche in lauter gleiche, hinreichend kleine Quadrate teilt, für die Mitten derselben E_h bestimmt und die Summe der E_h durch die Anzahl der Quadrate dividiert.

Ebenso verfährt man, wenn mehrere Lichtquellen vorhanden sind. Im Falle des Beispiels 6 braucht man wieder nur das schraffierte Rechteck in Fig. 179 in Betracht zu ziehen.

Es sei nur eine Lichtquelle L gegeben, und es sei S speziell ein Kreis, dessen Mittelpunkt im Fußpunkte A liegt; alsdann wird, wenn das Licht symmetrisch um LA verteilt ist,

$$E_m = \Phi/\varrho^2 \pi, \quad \ldots \quad 13)$$

wo in aller Strenge

$$\Phi = 2\pi h \int_0^\varrho \frac{J x\, dx}{(h^2 + x^2)^{3/2}}; \quad \Phi = 2\pi \int_0^{\vartheta_\varrho} J \sin\vartheta\, d\vartheta, \quad \ldots 14a) \; 14b)$$

wenn ϱ der Radius von S, und ϑ_ϱ die Poldistanz der nach der Peripherie von S gehenden Strahlen ist.

Beweis zu Gleichung 14a). Man zerlege S in kreisförmige Elementarringe. Ein Ring, der von zwei Kreisen mit den Radien x und $x + dx$ begrenzt wird, hat den Inhalt $2\pi x\, dx$; seine horizontale Beleuchtung ist nach Gl. 1b), S. 362 gleich $Jh/(h^2 + x^2)^{3/2}$; durch Multiplikation der beiden Ausdrücke und Integration nach x erhält man obiges Φ.

Beweise zu Gleichung 14b). 1. Führt man in Gleichung 14a) ϑ statt x mittels der Relation $x = h\, tg\, \vartheta$ als Variabele ein, so wird $x\, dx = h^2\, tg\, \vartheta\, d\vartheta / cos^2\, \vartheta$; ferner ist die horizontale Beleuchtung dieses Ringes nach Gl. 1c) gleich $J \cos^3 \vartheta / h^2$; die Multiplikation beider Ausdrücke gibt $J \sin\vartheta\, d\vartheta$.

2. Es ist allgemein $\Phi = \int J\, dw$, wo dw der räumliche Winkel ist, unter dem ein Element der Fläche S von L aus erscheint; für den Elementarring ist $dw = 2\pi \sin\vartheta\, d\vartheta$.

Setzt man in Gleichung 14b) $\cos\vartheta = y$, so geht sie über in [1])

$$\Phi = 2\pi \int J\, dy \quad \ldots \quad 15)$$

Nach dieser Formel lassen sich Φ und E_m ähnlich wie J_s, $J_{s,u}$ und $J_{s,o}$ graphisch bestimmen (S. 279). Trägt man y als Abszisse, das zugehörige J als Ordinate in einem rechtwinkeligen Koordinatensystem auf, so ist das Integral der Inhalt der Fläche, die von der so entstehenden Kurve, der Abszissenachse und den beiden Endordinaten begrenzt wird.

Ist J nach allen Richtungen konstant, so gehen Gleichungen 14) und 7) über in

$$\Phi = 2\pi J \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + \varrho^2}}\right) = 2\pi J (1 - \cos\vartheta_\varrho) \quad \ldots \quad 16)$$

$$\mathfrak{E} = 2\pi J \int_0^\varrho \frac{x\, dx}{h^2 + x^2} = \pi J \log nat \frac{h^2 + \varrho^2}{h^2} = 7{,}234\, J \log \frac{h^2 + \varrho^2}{h^2}. \quad 17)$$

---

[1]) E. T. Z. **27**, 493 und 843 (1906); J. f. G. u. W. **49**, 90 (1906).

Für $\varrho = \infty$ wird $\Phi = 2\pi J$; es ist dies der Gesamtlichtstrom, welcher der unendlich großen Horizontalebene durch L zugesandt wird.

Wybauw geht beim Vergleiche der Beleuchtungswirkungen zweier Lichtquellen von dem vollständigen Nutzeffekt aus und berücksichtigt hierbei den Überfluß an Beleuchtung. Als Beispiel möge der Fall dienen, daß eine Kreisfläche mit dem Radius ϱ durch eine nach allen Richtungen mit der Lichtstärke J leuchtende Lampe beleuchtet wird; hierbei soll eine normale Beleuchtung größer als n Lux als überflüssig angesehen werden. Alsdann ergibt sich der Radius x des die überflüssige Beleuchtung einschließenden Kreises aus

$$J/(h^2 + x^2) = n, \text{ so daß } x = \sqrt{J/n - h^2}.$$

Setzt man diesen Wert für x in Gleichung 17) (S. 369) ein, so erhält man den vollständigen Nutzeffekt im Innern dieses Kreises gleich $7{,}234\, J \log (J/n h^2)$. Dieser Nutzeffekt wäre, wenn jedes Element die normale Beleuchtung n Lux erhielte, $\pi(J - n h^2)$; die Differenz beider gibt die überschüssige Beleuchtung. Der wirklich nützliche Beleuchtungseffekt ist dann nach Wybauw

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}' &= 7{,}234\, J \log \{(h^2 + \varrho^2)/h^2\} - 7{,}234\, J \log (J/n h^2) + \pi(J - n h^2) \\ &= 7{,}234\, J \log \{n(h^2 + \varrho^2)/J\} + \pi(J - n h^2). \end{aligned}$$

Ist der Radius ϱ des zu beleuchtenden Kreises gegeben, so erhält man die Höhe h, für welche $\mathfrak{E}'$ ein Maximum wird, aus

$$d\mathfrak{E}'/dh = 2\pi h (J/\{h^2 + \varrho^2\} - n) = 0, \text{ so daß } h = \sqrt{J/n - \varrho^2}.$$

§ 154. Beleuchtung von Straßen und freien Plätzen.

Wir wollen uns jetzt mit der Frage nach der Aufstellung von Lichtquellen für die Zwecke der Beleuchtung von Straßen und freien Plätzen beschäftigen. In früheren Jahren ließ man sich bei solchen Installationen fast ausschließlich durch das Gefühl leiten. Heute geht man gewöhnlich *rechnerisch* vor, und dieses Verfahrens wollen auch wir uns hier bedienen.

Zunächst ergibt sich hierbei die wichtige und schwer zu beantwortende Frage, ob man die horizontale oder die vertikale Beleuchtung für die Beurteilung der Güte einer Straßenbeleuchtung in Betracht ziehen soll.

a) Die horizontale Beleuchtung sei maßgebend.

Von vielen Autoren (z. B. Uppenborn, Maréchal, Lux, Zeidler, Bloch) wird als erster Zweck der Beleuchtung der angesehen, auf dem Straßendamm befindliche Gegenstände (Pflastersteine, heruntergefallene Geldstücke, Hindernisse usw.) zu erkennen, und dementsprechend wird von ihnen die horizontale Beleuchtung auf dem Straßendamm als maßgebend angesehen. Da die experimentelle Bestimmung der letzteren relativ unbequem ist, wird vielfach statt dieser Größe die hori-

zontale Beleuchtung in Augenhöhe (etwa 1,5 m über dem Straßendamm) in Betracht gezogen.

Bei Zugrundelegung der horizontalen Beleuchtung ist das Beleuchtungsproblem im einfachsten Falle folgendes: Es ist ein gewisses Minimum der horizontalen Beleuchtung E_{min} der in Betracht gezogenen Horizontalebene (Straßendamm oder Ebene in Augenhöhe) zugelassen, welches mit Rücksicht auf die Sicherheit des Verkehrs nicht unterschritten werden darf; ferner sind die Lampenart und ihre Höhe vorgeschrieben, und es wird nach ihrer Zahl und ihrer Verteilung gefragt; in einzelnen Fällen wird auch die Höhe gesucht.

Wir wollen diesen einfachen Fall zugrunde legen und ferner der Einfachheit wegen annehmen, daß außer den aufzustellenden Lichtquellen kein fremdes, z. B. von den Wänden der benachbarten Häuser reflektiertes Licht einwirke. Das letztere Licht ist ein schwer bestimmbares Element, dessen Einfluß von Krüss[1]) übrigens relativ gering veranschlagt wird, da die Wände im allgemeinen nur ein kleines diffuses Reflexionsvermögen besitzen, und da große Flächen der Häuser in Verkehrsstraßen im Erdgeschoß und ersten Stockwerk durch große Spiegelscheiben in Anspruch genommen sind. Wir werden sehen, daß schon für die idealen, unter 1. behandelten Lichtquellen eine streng mathematische Durchführung einer solchen Rechnung nicht immer einfach ist, so daß man dann am besten ein graphisches Verfahren anwendet. Des letzteren muß man sich immer bedienen, wenn man es mit den gewöhnlichen Lichtquellen zu tun hat.

Für Hauptstraßen verlangt Wybauw, wie bereits S. 368 erwähnt wurde, mindestens 1 Lux; für Nebenstraßen sollte man nach H. Lux nicht unter 0,5 Lux heruntergehen. Zum Vergleich sei hinzugefügt: Die Beleuchtung durch den *Vollmond* auf einer zu den Strahlen senkrechten Ebene beträgt bei klarer Luft und wolkenlosem Himmel etwa 0,26 Lux. Die dreijährigen Monatsmittel der mittäglichen Beleuchtung einer horizontalen freien Fläche durch das *gesamte Tageslicht*, also durch die Summe der direkten Sonnenstrahlen und des diffusen Lichtes des ganzen Himmelsgewölbes, schwanken nach Weber[2]) für Kiel zwischen 5470 Lux (Dezember) und 60950 Lux (Mai); das absolute Maximum bzw. Minimum war 154300 bzw. 655 Lux. In Berliner Gemeindeschulen fand Huth 1 m vom Fenster 354 bis 420 Lux, 5 m vom Fenster 25 bis 46 Lux und 7 m vom Fenster 5 bis 16 Lux. Vgl. ferner S. 193 oben.

1. *Ideale, nach allen Seiten gleichmäßig leuchtende Lichtquellen.*

Eine einzige Lichtquelle. Aus der Tabelle S. 364 geht folgendes hervor. Die Beleuchtung E_h ist am Fuße des Kandelabers

[1]) J. f. G. u. W. 49, 821 (1906).
[2]) Handbuch der Hygiene 4, 71 (1895).

($x = 0$) für $h = 4$ kleiner als für $h = 3$ m. E_h ist für $x = 5$ m in beiden Fällen gleich und nimmt mit wachsendem x für $h = 4$ langsamer als für $h = 3$ m ab. Die Beleuchtung ist also für $h = 4$ m gleichförmiger als für $h = 3$ m. Sie ist für $h = 8$ m noch gleichmäßiger. Zur Erzielung einer möglichst gleichförmigen horizontalen Beleuchtung hat man also möglichst hohe Kandelaber anzuwenden.

Aus Gl. 1 b), S. 362 ist ersichtlich, daß E_h bei einem gegebenen x sowohl für $h = 0$ als auch für $h = \infty$ gleich Null wird. Bei einem gewissen endlichen Werte h muß E_h also ein Maximum werden. Diese günstigste Höhe ist nach Uppenborn [1])

$$h = x\sqrt{0{,}5} = 0{,}707\,x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Ihr entspricht der Ausstrahlungswinkel $\vartheta = 54{,}7^0$ $\left(tg\,\vartheta = \sqrt{2}\right)$.

Beweis. Differenziert man Gleichung 1 b), S. 362, nach h und setzt den Differentialquotienten gleich Null, so wird

$$\frac{J}{(h^2+x^2)^{3/2}} - \frac{3\,J\,h^2}{(h^2+x^2)^{5/2}} = 0,$$

so daß nacheinander

$$J(h^2 + x^2) = 3\,J\,h^2;\; h^2 = 0{,}5\,x^2.$$

Ist eine horizontale Kreisfläche vom Radius r durch eine einzige Lichtquelle von gegebener Lichtstärke derart zu beleuchten, daß die Randfläche eine möglichst große Beleuchtung erhalte, so bringt man die Lichtquelle demnach senkrecht über der Mitte in der Höhe $h = 0{,}707\,r$ an.

Bedeutet E_M bzw. E_R die Beleuchtung in der Mitte bzw. am Rande, so ist

$$E_M = J/h^2 = 2\,J/r^2 \text{ Lux} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

$$E_R = J\,sin^2\,54{,}7 \cdot cos\;54{,}7/r^2 = 0{,}385\,J/r^2 \text{ Lux} \quad . \quad . \quad 3)$$

so daß

$$E_M/E_R = 5{,}2.$$

Sind E_R und r vorgeschrieben, so findet man aus Gleichung 3)

$$J = E_R \cdot r^2/0{,}385 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Sind E_R und J vorgeschrieben, so wird

$$r = \sqrt{0{,}385 \cdot J/E_R} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Beispiel. Mit $J = 500$ HK kann man nach Gleichung 5) beleuchten

mit mindestens	1	2	4	6	10	15	20	30	50 Lux	6)
einen Bodenkr. v.	13,8	9,8	7,0	5,7	4,4	3,6	3,1	2,5	1,9 m Radius.	

Zwei Lichtquellen. Dieselben sollen sich in der gleichen Höhe h befinden und gleich stark leuchten; ihr Abstand sei $2d$. Offenbar

---

[1]) Z. f. angew. Elektrizitätslehre 2, 380 (1880).

erhält dann der Punkt in der Mitte zwischen beiden Fußpunkten die schwächste horizontale Beleuchtung, und zwar

$$E_{min} = 2\,J h/(h^2 + d^2)^{3/2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

Aufgabe 1. Es ist J und $2d = 20$ m gegeben; es wird nach der Höhe h gefragt, für welche E_{min} seinen größten Wert erreicht. Dieser Wert ist $h = 0{,}707\ d = 7{,}07$ m. Eine so große Höhe darf man jedoch nur bei starken Lichtquellen wählen, weil sonst die Beleuchtung in der Nähe des Kandelabers zu klein wird.

Aufgabe 2. Es ist $J = 500$ HK und $E_{min} = 8$ Lux gegeben; es wird nach dem günstigsten Abstande $2d$ und der günstigsten Höhe h gefragt. Jede Lampe hat dann 4 Lux zu liefern; hierzu gehört nach Tab. 6) a. v. S. $d = 7$ m, also $2d = 14$ m und $h = 7 \times 0{,}707 = 4{,}9$ m.

Drei Lichtquellen. Dieselben sollen, wie es nach dem Vorgange von Uppenborn häufig bei der Beleuchtung von großen, freien Plätzen geschieht, die Ecken von gleichseitigen Dreiecken bilden. E_{min} fällt dann in den Schwerpunkt des gleichseitigen Dreiecks, und zwar ist

$$E_{min} = 3\,J h/(h^2 + {}^1\!/_3 a^2)^{3/2} = 3\,J/h^2(1 + {}^1\!/_3 a^2/h^2)^{3/2}, \; . \; . \quad 8)$$

wenn h wieder die Kandelaberhöhe und a die Seite des gleichseitigen Dreiecks ist.

Sind E_{min}, J und h gegeben, so erhält man aus Gleichung 8)

$$a = \sqrt{3(3\,J h/E_{min})^{2/3} - 3\,h^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 9)$$

Sind dagegen E_{min}, J und a gegeben, so läßt sich h am besten graphisch bestimmen, indem man den Ausdruck auf der rechten Seite von Gleichung 8) für eine Reihe von h berechnet und in einer Kurve zusammenstellt. Alsdann ist h die Abszisse desjenigen Punktes der Kurve, deren Ordinate gleich E_{min} ist.

2. *Gewöhnliche Lichtquellen.*

Eine Lichtquelle. Auch hier ist die horizontale Beleuchtung um so gleichförmiger, je größer die Kandelaberhöhe h ist, und es besteht für einen gegebenen Seitenabstand x eine günstigste Höhe h; dieselbe ist nach Blondel für

nackten Lichtbogen	$h = 0{,}95\,x$
Lichtbogen in mattierter Glocke	$h = 0{,}85\,x$
„ „ Opalglocke . .	$h = 0{,}50\,x$ bis $0{,}80\,x$
„ „ Holophanglocke .	$h = 0{,}50\,x$.

Mehrere Lichtquellen. α. Die Lampen seien in einer Geraden über der Mitte der Straße angeordnet, wie es vielfach bei Beleuchtung durch Bogenlicht geschieht. Alsdann braucht man bei Straßen von 14 bis 20 m Breite nur die Verteilung der Beleuchtung in der Verbindungslinie der Fußpunkte zweier aufeinander folgender Lichtquellen zu berücksichtigen, um so mehr, wenn zu beiden Seiten der

Straße Häuser stehen, da das von den Wänden derselben reflektierte Licht einen teilweisen Ausgleich in der schwächeren Beleuchtung der seitlich gelegenen Punkte erzielt. E_{min} liegt dann in der Mitte zwischen den Fußpunkten zweier benachbarter Lichtquellen.

β. Die Lampen seien abwechselnd auf beiden Seiten der Straße wie in Fig. 179 verteilt. In diesem Falle muß man die von allen oder doch wenigstens den nächsten Lichtquellen erzielte Beleuchtungswirkung in Betracht ziehen. Im Falle des Beispiels 5, S. 366 liegt, wie Fig. 180, S. 368 zeigt, E_{min} in der Mitte zwischen den Fußpunkten zweier benachbarter Lichtquellen derselben Straßenseite.

Sind E_{min} und h vorgeschrieben, so zeichnet man die für h gültige Beleuchtungskurve (Fig. 177, S. 365) und entnimmt aus derselben den zu E_{min} gehörigen. Seitenabstand x. Alsdann gibt $2x$ im Falle α bzw. β den Abstand der in der Mitte der Straße bzw. auf jeder Straßenseite aufzuhängenden Lampen.

Wir hatten bisher E_{min} für die Berechnung zugrunde gelegt. Für gewöhnlich wird jedoch die mittlere horizontale Beleuchtung E_m als am wichtigsten für die Beurteilung der Straßenbeleuchtung angesehen. In diesem Falle wird die Rechnung noch komplizierter. Man muß dann bei gegebener Höhe h der Lichtquellen ihren Abstand $2d$ bei Vorausberechnungen so lange variieren, bis man das vorgeschriebene E_m erhält. Als **Wirtschaftlichkeit der Straßenbeleuchtung** wird hierbei der Verbrauch an elektrischer Energie oder Leuchtstoff für 1 Lux mittlere horizontale Beleuchtung und 1 (bzw. 100) qm Straßenfläche bezeichnet, ebenso wie die Wirtschaftlichkeit einer Lichtquelle durch den spezifischen Verbrauch $\mathfrak{C}_s$ gemessen wird (S. 360).

Von allen Beleuchtungstechnikern, welche beim Entwurf einer Straßenbeleuchtung von E_{min} oder E_m ausgehen, wird außerdem noch eine **möglichst gleichmäßige horizontale** Beleuchtung, d. h. ein möglichst hoher Wert für das Verhältnis zwischen E_{min} und E_{max}, angestrebt. Sind bei der für ein gegebenes h und ein gegebenes E_{min} bzw. E_m berechneten Anlage die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung nicht erfüllt, so muß man, falls dies angängig ist, entweder h vergrößern oder d verkleinern oder beide Änderungen gleichzeitig vornehmen.

Ausführlicheres s. Bloch (Anm. 1, S. 369).

b) Die vertikale Beleuchtung sei maßgebend.

Blondel macht darauf aufmerksam, daß bei gleichmäßiger horizontaler Beleuchtung durch eine Lichtquelle die vertikale Beleuchtung E_v [Gl. 3), S. 362] proportional $tg\,\vartheta$ wächst, was die seltsamsten Effekte hervorrufen würde. Er kommt zum Schlusse, daß für Straßenbeleuchtung diejenige Lichtquelle die geeignetste ist, welche unter Ausstrahlungswinkeln ϑ von 0 bis 45° eine konstante Lichtstärke besitzt,

welche für ϑ von 45 bis 80° eine gleichmäßige vertikale Beleuchtung E_v hervorruft, und deren Lichtstärke von $\vartheta = 80$ bis 90° schnell auf Null herabsinkt. Nach Blondel genügt ein mit einer Holophanglocke versehener Lichtbogen dieser Forderung nahezu.

Drehschmidt[1]) und Krüss (Anm. 1, S. 371) betrachten für die Güte einer Straßenanlage diejenige Beleuchtung $E_{v'}$ (S. 362), welche kleine, senkrecht zum Verlaufe der Straße in Augenhöhe aufgestellte, vertikale Flächen empfangen, als maßgebend, indem sie die Ansicht vertreten, daß es sich in erster Linie darum handelt, entgegenkommende Personen und Gegenstände rechtzeitig und richtig zu erkennen; auf dem Straßenpflaster habe man selten etwas zu suchen oder aufzuheben oder sich vor Hindernissen in Obacht zu nehmen, und wenn man ein Notizbuch u. dgl. lesen wolle, halte man diese Gegenstände mit Bedacht immer so, daß sie die größtmögliche Beleuchtung erhalten, also von den Strahlen der nächsten Lichtquelle senkrecht getroffen werden. Drehschmidt hat in verschiedenen Berliner Straßen, u. a. auch in der Leipziger Straße photometrische Messungen ausgeführt. Krüss hat die Verhältnisse, wie sie in der Leipziger Straße liegen, unter Annahme von nach allen Richtungen gleichmäßig leuchtenden Lichtquellen einer Rechnung unterzogen und seine Werte mit denjenigen von Drehschmidt verglichen; die Übereinstimmung ist relativ gut.

Die vorher angeführten Ansichten über das Maß für die Beurteilung der Güte der Straßenbeleuchtung haben etwas willkürliches an sich, da die zu beleuchtenden Gegenstände und Personen Flächen in allen möglichen Richtungen besitzen. Es ist also nicht gerechtfertigt, immer entweder horizontale oder vertikale Flächen zu bevorzugen; vielmehr sollte man sich stets nach den Anforderungen des einzelnen Falles richten. Die vorher durchgeführten Rechnungen hatten nur den Zweck, einen Fingerzeig dafür zu geben, wie man beim Entwurf von Anlagen zu verfahren hat.

§ 155. Beleuchtung von Innenräumen.

Bei der Beleuchtung von Innenräumen spielt das von den Begrenzungsflächen (Wänden, Decke, Fußboden) sowie von den im Innern befindlichen Gegenständen diffus reflektierte Licht eine hervorragende Rolle. Durch dieses Licht wird die Beleuchtung 1. ähnlich wie durch das diffuse Tageslicht, das als Vorbild für die künstliche Beleuchtung dient, gleichmäßiger gemacht, so daß scharfe Schattenbildungen vermieden werden, 2. zuweilen bedeutend verstärkt.

Wir gehen zunächst aus von dem in aller Strenge gültigen

Satz von Mascart[2]). Ein allseitig geschlossener Raum sei von Flächen begrenzt, welche in allen Elementen und unter allen Einfalls-

[1]) J. f. G. u. W. 46, 758 (1903).
[2]) Bull. Soc. Int. Électr. 5, 103 (1886).

winkeln den gleichen Bruchteil $f = R + M$ reflektieren, wo R und M das regelmäßige und diffuse Reflexionsvermögen sind. Wenn die in diesem Raume befindlichen Lichtquellen im ganzen den Lichtstrom Φ (in Lumen, S. 149) aussenden, so ist der von den Begrenzungsflächen nach einer unendlichen Anzahl von Reflexionen aufgenommene Lichtstrom

$$\Phi' = \Phi/(1-f) \quad \ldots \quad 1)$$

Beweis (vgl. Kugelphotometer, S. 301 und 302). Auf die Begrenzungsfläche fällt der direkte Lichtstrom Φ; von diesem wird der Betrag $f\Phi$, von dem letzteren $f^2\Phi$ usw. reflektiert, so daß

$$\Phi' = \Phi + f\Phi + f^2\Phi + \cdots = \Phi/(1-f).$$

Schreibt man Gleichung 1) in der Form

$$(1-f)\Phi' = \Phi, \quad \ldots \quad 2)$$

so kann man den Satz auch so aussprechen:

Der von den (undurchsichtigen) Begrenzungsflächen absorbierte Lichtstrom $(1-f)\Phi'$ ist gleich dem von den gesamten Lichtquellen erzeugten Lichtstrom Φ.

Im folgenden wollen wir uns mit nur *diffus* reflektierenden Flächen beschäftigen, also setzen

$$R = 0;\ f = M \quad \ldots \quad 3)$$

Bezeichnet

S die Gesamtoberfläche des oben erwähnten Raumes in Metern,
E' die durch die unendlich vielen diffusen Reflexionen erzeugte mittlere Beleuchtung der Begrenzungsflächen in Lux,
E die mittlere direkte Beleuchtung in Lux,
$\mathfrak{k}$ die mittlere Verstärkung der Beleuchtung, also E'/E, so ist

$$E' = \Phi'/S = \Phi/\{(1-M)S\};\ E = \Phi/S;\ \mathfrak{k} = 1/(1-M) \ . \quad 4)$$

Beispiel 1. Es sei $M = 0{,}5$ bzw. $0{,}9$; alsdann wird $\mathfrak{k} = 2$ bzw. 10; d. h. die Beleuchtung wird durch die unendlich vielen Reflexionen durchschnittlich verdoppelt bzw. verzehnfacht.

Wenn die Begrenzungsflächen aus Teilen von der Größe $S_1, S_2 \cdots$ bestehen, deren diffuse Reflexionsvermögen $M_1, M_2 \cdots$ sind, so bleiben die vorstehenden Gleichungen noch annähernd gültig, wenn man M ersetzt durch das durchschnittliche Reflexionsvermögen

$$M' = (S_1 M_1 + S_2 M_2 + \cdots)/(S_1 + S_2 + \cdots) \quad \cdot \cdot \cdot \quad 5)$$

Beispiel 2. Es sei ein kubischer Raum gegeben, und zwar möge bezeichnen S_1, S_2, S_3 die Fläche der Decke, der Wände und des Fußbodens, so daß $S_2 = 4\,S_1 = 4\,S_3$. Ferner sei $M_1 = 0{,}40$ (helle Decke), $M_2 = M_3 = 0{,}20$ (Wände und Fußboden von dunkler Farbe). Alsdann ist nach Gleichung 5) $M' = (0{,}40 + 0{,}80 + 0{,}20)/6 = 0{,}233$ (23,3 Proz.), mithin $\mathfrak{k} = 1/(1 - 0{,}233) = 1{,}3$.

Ist $M_1 = 0{,}80$ (frisch geweißte Decke), so wird $M' = 0{,}30$; $\mathfrak{k} = 1{,}43$.

Wenn die Decke 80 Proz., die Wände 50 Proz. und der Fußboden 20 Proz. reflektieren; so ist $M' = 0{,}50$; $\mathfrak{f} = 2$.

Ein Saal, dessen Gesamtoberfläche S und dessen mittleres diffuses Reflexionsvermögen M' sei, werde durch n Lampen beleuchtet, von denen jede die in Hefnerkerzen ausgedrückte mittlere räumliche Lichtstärke J_s besitzt. Alsdann ist der in Lumen ausgedrückte Gesamtlichtstrom $\Phi = 4\pi n J_s$ (S. 270); demnach nach Gleichung 4)

$$E' = 4\pi n J_s / \{(1 - M') S\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 6)$$

mithin die auf 1 qm der Oberfläche kommende mittlere räumliche Lichtstärke

$$p = n J_s / S = E'(1 - M')/4\pi \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

Ist e' die mittlere Flächenhelle der Begrenzungsflächen, bezogen auf das Quadratmeter, so ist, falls die letzteren vollkommen diffus reflektieren, entsprechend Gleichung 1 auf S. 91, $e' = M' E'/\pi$, demnach

$$e' = 4 n M' J_s / \{(1 - M') S\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

Beispiel 3. Es sei $S = 160$ qm; $M' = 0{,}4$; $n = 3$; $J_s = 16$ HK. Alsdann ist nach Gleichung 6) $E' = 6{,}28$ Lux.

Beispiel 4. Für $E' = 9{,}42$ Lux und $M' = 0{,}4$ wird nach Gleichung 7) $p = 0{,}45$ HK.

Beispiel 5. Ist $S = 900$ qm; $M' = 0{,}6$; $J_s = 10$ HK; so ist für $e' = 2$ HK nach Gleichung 8) $n = 30$.

Die eben entwickelten Formeln [1]) beziehen sich nur auf größere leere Räume unter Zugrundelegung eines mittleren Reflexionsvermögens und sind nur in roher Annäherung gültig, da sie sich nur auf ungefähre Mittelwertschätzungen gründen. Überdies berücksichtigen sie nicht die Höhe sowie die Verteilung der Lichtquellen. Kleinere Räume, insbesondere Wohnräume, in welchen die verschiedenartigsten Gegenstände mit den verschiedensten Reflexionsvermögen zusammengedrängt stehen, entziehen sich vollständig der mathematischen Behandlung.

Die Beleuchtungstechniker begnügen sich deshalb mit empirischen Feststellungen, welche sich auf Lampenzahl und Lichtstärke beziehen und in Tabellen zusammengestellt werden. Hierbei sind bestimmte Verhältnisse zwischen der Größe der Bodenfläche und der Summe der Lichtstärken aller Lampen angenommen; ferner werden dabei stillschweigend oder ausdrücklich noch bestimmte Voraussetzungen über die Höhe der Lampen über der Bodenfläche gemacht. Bei Beleuchtung mit elektrischen Glühlampen gibt Strecker [2]) für die auf 1 qm Bodenfläche kommende Lichtstärke in Hefnerkerzen eine Tabelle an, aus welcher wir den nachstehenden Teil als Beispiel mitteilen wollen:

Wohnungen: Salons 4 bis 5; Wohn- und Speisezimmer 3 bis 3,5; Schlafzimmer 1,5 bis 2; Nebenräume 1 bis 2 HK.

---

[1]) Vgl. Blondel, L'Éclair. électr. 8, 364 (1896).

[2]) Hilfsbuch für die Elektrotechnik 1907, S. 630.

Nach Preece soll auf das Quadratmeter Bodenfläche bei der Beleuchtung von großen Räumen durch Bogenlampen 5 Watt (also etwa 5 HK), bei der Beleuchtung von Privatzimmern durch elektrische Glühlampen 10 Watt (also etwa 3 HK) kommen. Die Lichtquellen sind hierbei so anzuordnen, daß die Beleuchtung möglichst gleichförmig wird.

Um ein möglichst gleichmäßig zerstreutes, dem diffusen Tageslicht nahe kommendes Licht zu erhalten, benutzt man in Lese- und Zeichensälen, Museen usw. gewöhnlich Gleichstrombogenlampen mit der üblichen Anordnung der positiven Kohle als Oberkohle und läßt das Licht derselben mittels geeigneter Vorrichtungen, z. B. mittels des Hrabowskischen Seitenlichtapparates, auf die geweißte Decke fallen. Zuweilen verwendet man auch Bogenlampen mit positiver Unterkohle (Invertlampen), weil sie den größten Teil des Lichtstromes direkt an die Decke werfen. Diese Lampen brennen aber nicht immer tadellos, da es leicht vorkommen kann, daß sich im Krater Verunreinigungen, insbesondere Kügelchen flüssiger Kieselsäure, ansammeln, die dann ein Flimmern des Bogens verursachen.

Zuweilen wählt man einen Mittelweg zwischen der indirekten Beleuchtung und der extremen Einzelbeleuchtung, indem man eine nicht allzu große Allgemeinbeleuchtung herstellt und außerdem jeden Arbeitstisch mit einer Lampe versieht, welche eine möglichst intensive Beleuchtung auf dem Tisch erzeugt. In Theatern, Konzertsälen, Bahnhöfen hat man in erster Linie für eine gute Allgemeinbeleuchtung Sorge zu tragen.

Anleitung zum Projektieren von Beleuchtungsanlagen geben unter anderen Körting u. Mathiesen [1]).

Zwölftes Kapitel.

Vorschriften für photometrische Prüfungen.

§ 156. Vorschriften für die Lichtmessung von elektrischen Glühlampen.

Vom Verbande Deutscher Elektrotechniker [2]) sind unter ausdrücklicher Einschränkung auf *hufeisen- und einfach schleifenförmige Kohlenfäden* die folgenden Vorschriften angenommen worden:

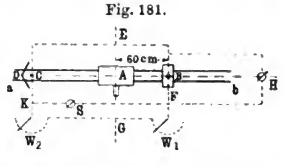
Unter Lichtstärke wird die mittlere Lichtstärke in der zur Lampenachse senkrechten Ebene verstanden. Sie wird bestimmt mit

[1]) Das Bogenlicht und seine Anwendung. Leutzsch-Leipzig 1899, 152 S.

[2]) E. T. Z. **18**, 473 (1897).

Hilfe der in Fig. 181 skizzierten Anordnung. Es bedeutet *a b* eine gerade Photometerbank von 2,5 m Länge, *A* den Photometerkopf, *B* eine Hilfslichtquelle (Vergleichslichtquelle), *C* die zu messende Lampe bzw. die Normallampe, *D* einen Winkelspiegel. *A* und *B* ruhen auf Wagen oder Schlitten und lassen sich miteinander fest verbinden, so daß sie gemeinschaftlich der Lampe *C* genähert oder von ihr entfernt werden können. Die Entfernung zwischen *A* und *B* beträgt 60 cm und muß um 6 cm nach jeder Seite verstellbar sein. Der Winkelspiegel besteht aus zwei quadratischen Stücken guten, ebenen Glasspiegels (Silberspiegel) von 13 cm Seitenlänge und 2 bis 5 mm Dicke, welche einen Winkel von 120° einschließen. Er ist mit vertikaler Scheitelkante am Ende *a* der Bank so aufgestellt, daß er zu ihrer Längsachse symmetrisch steht und dem Photometerkopf zugewandt ist. Der Abstand der Scheitelkante von der Achse der Lampe *C* beträgt 9 cm. Die Achse der Lampe *C* soll vertikal stehen; die Endpunkte des Kohlenfadens müssen in einer zur Photometerachse senkrechten Ebene liegen. Die Photometerbank trägt eine nach dem Entfernungsgesetze berechnete Teilung in Kerzen, in der Weise, daß der Nullpunkt dem Scheitel des Winkelspiegels entspricht und der Teilstrich 10 um 1 m von dem Nullpunkte entfernt ist. Die Zehntelkerzen sollen noch durch Teilstriche bezeichnet sein. Mit Hilfe von schwarzen Schirmen, am besten Samtschirmen, ist zu verhüten, daß fremdes Licht auf den Photometerschirm gelangt. Andererseits darf kein Teil der Lampen oder ihrer Spiegelbilder abgeblendet werden.

Fig. 181.



Als Normale dienen Glühlampen mit einem Energieverbrauch von $3\frac{1}{2}$ bis $4\frac{1}{2}$ Watt für eine Kerze [1]), welche ungefähr dieselbe Spannung und genau dieselbe Lichtstärke besitzen, welche die zu messenden Lampen haben sollen. Demnach sind zufolge der Einschränkung dieser Bestimmungen auf Lampen bestimmter Lichtstärken Normallampen von 10, 16, 25 und 32 Kerzen erforderlich.

Als Vergleichslampe dient eine fehlerfreie Glühlampe von etwa 10 Kerzen und für ungefähr dieselbe Spannung, für welche die zu messenden Lampen bestimmt sind. Es empfiehlt sich, diese Lampe 20 bis 30 Stunden vor der Benutzung zu brennen, um die bei neuen Lampen auftretenden Änderungen der Lichtstärke zu vermeiden.

Zur Ausführung der *Spannungsmessung* liegen in den parallelen Zweigen *EFG* und *EKG* einerseits die Lampe *B* und der Regulierwiderstand W_1, andererseits die Lampe *C* und der Regulierwiderstand W_2. Bei *K* und *F* ist ein Spannungsmesser *S* für geringe Spannungen angelegt; außerdem liegt an *B* ein technischer Spannungszeiger *H*, welcher dazu dient, der Lampe *B* mit Hilfe von W_1 die vorgeschriebene Spannung zu geben; die Lampe *C* erhält jedesmal die ihr zukommende Spannung, indem man unter Benutzung von W_2 im Spannungsmesser *S* die entsprechende Spannungsdifferenz zwischen den Lampen *C* und *B* herstellt.

Die *Lichtmessung* geschieht nun folgendermaßen. Zunächst erhält die Vergleichslampe *B* die richtige Spannung mit Hilfe von W_1 und *H*. Dann wird:

1. Bei *C* die Normale aufgesetzt und mit Hilfe von *S* und W_2 einreguliert; hierauf wird der Photometerkopf *A* auf die der Lichtstärke der Normale entsprechende Entfernung eingestellt und durch Veränderung der

---

[1]) $\mathfrak{E}_m = 3\frac{1}{2}$ bis $4\frac{1}{2}$ Watt nach unserer Bezeichnungsweise.

Entfernung AB eine photometrische Einstellung ausgeführt. Dann werden AB fest miteinander verbunden.

2. Nun wird bei C an die Stelle der Normale die zu messende Lampe gesetzt und unter Benutzung von S und W_2 einreguliert, d. h. auf die auf der Lampe verzeichnete Spannung eingestellt. Dann wird eine photometrische Messung durch Verschiebung des mit der Lampe B fest verbundenen Photometerkopfes ausgeführt.

Hierzu wird bemerkt:

Die von Strecker[1]) angegebene Methode der Parallelschaltung von nahezu gleichvoltigen Lampen bietet den Vorteil, daß die beiden Spannungsmesser H und S nicht mit der größten Sorgfalt geeicht zu sein brauchen, und daß man Akkumulatoren, welche gleichzeitig von mehreren Seiten, wenn auch nur schwach, beansprucht werden, sowie mäßig schwankenden Dynamostrom anwenden kann, weil bei Stromschwankungen die Lampen B und C ungefähr die gleichen Schwankungen in der Lichtstärke zeigen.

Genauigkeit der Winkelspiegelmethode. Durch direkte Messungen (vgl. § 146 a) fand Verfasser[2]) mit konstantem Akkumulatorenstrom und genau zeigenden Spannungsmessern den Fehler der Lichtstärkenbestimmung zu $\pm$ 1,9 Proz.; der größte beobachtete Fehler war 6 Proz.

Ferner berechnete er die Fehler aus der beobachteten horizontalen Lichtverteilung (vgl. Fig. 162 a und b, S. 329). Hierbei ergab sich folgendes:

Die von dem Verbande Deutscher Elektrotechniker für die *Lampentypen 2a, 2b und 3a* Fig. 160, S. 328) angenommene Spiegelmethode läßt sich auch für die *übrigen* in dieser Figur zusammengestellten Typen 2 bis 4 mit einer für die Zwecke der Praxis im allgemeinen befriedigenden Genauigkeit anwenden, wenn die zu messende Lampe und die Normallampe *derselben Type* angehören, ungefähr gleichkerzig sind und so aufgestellt werden, daß die direkten Strahlen in Richtung II (S. 329) ins Photometer fallen. Das Verhältnis der Lichtstärke der zu messenden Lampe zu derjenigen der Normallampe darf sogar zwischen etwa 0,6 und 1,6 liegen. Beispielsweise kann man eine 16- bzw. 25-kerzige Lampe mittels einer 10- bzw. 16-kerzigen Lampe mit ungefähr derselben Genauigkeit wie mittels einer gleichkerzigen messen. Ferner dürfen die Spannungen der zu messenden Lampe und der Normallampe beträchtlich voneinander abweichen. Bei dieser Verallgemeinerung der Methode muß man allerdings auf Parallelschaltung der Lampen B und C verzichten, mithin an jede Lampe einen besonderen Spannungsmesser anlegen und mit konstantem Akkumulatorenstrom arbeiten.

Die bei Anwendung der Spiegelmethode begangenen Fehler können, da man im Grunde genommen nur in drei Richtungen mißt, infolge von Reflexen unter Umständen recht erheblich werden. Würde der größte Reflex, den Verfasser bei seinen Messungen beobachtete, zufällig in eine der Ausstrahlungsrichtungen gefallen sein, so wäre dadurch ein Fehler von 17 Proz. entstanden.

Die Verbandsmethode sieht nur Lichtstärkemessungen bei gegebener Spannung vor. Man kann nach dieser, sowie nach der verallgemeinerten Methode aber auch die *Spannung bei gegebener Lichtstärke messen.*

Wenn man die Lampen 3b bis 3d (Fig. 160, S. 328), wie es in der Praxis vielfach geschieht, unter Benutzung einer Normallampe von den Typen 2a bis 2d nach der Winkelspiegelmethode photometrieren will, so

[1]) Hilfsbuch f. d. Elektrot. 1888, S. 267.

[2]) Z. f. Instrk. **19**, 200 (1899).

wird man, wie neuerdings auch Lux[1]) feststellt, erhebliche Fehler machen können; jedoch lassen sich allenfalls noch die Lampen 3a mittels der letzteren Lampen messen.

Metallfadenlampen. Die Lampen mit der bisher üblichen Anordnung der Glühfäden lassen sich auch bei Benutzung von Normallampen derselben Art nicht nach der Winkelspiegelmethode messen, weil diese Lampen oft Lichtverteilungskurven mit schnell aufeinanderfolgenden, stark ausgeprägten Maximis und Minimis besitzen, also starke Unstetigkeiten zeigen.

Lux hat infolge seiner ungünstigen Ergebnisse die Winkelspiegelmethode aufgegeben und läßt nach dem Vorgange von Crova (S. 332) die Lampen rotieren. In der Reichsanstalt wird in allen Fällen der rotierende Spiegelapparat von Brodhun (Fig. 163, S. 332) benutzt. Bei denjenigen Lampen, welche sich in allen Lagen brennen lassen, stellt man hierbei, wie bereits S. 331 angegeben wurde, den Spiegelapparat horizontal so auf, daß die Rotationsachse in der Verlängerung der optischen Achse der Photometerbank liegt, welche ein Lummer-Brodhunsches Photometer trägt. Bei denjenigen Metallfadenlampen, welche vertikal hängen müssen, wird der Apparat in geeigneter Höhe an einem der Balkons des Photometerzimmers (vgl. Fig. 159, S. 325) vertikal aufgestellt, und zur Vermeidung eines neuen Spiegels, welcher die vom Spiegelapparat vertikal nach unten reflektierten Strahlen in horizontaler Richtung auf den Photometerschirm werfen müßte, werden Photometerbank und Photometeraufsatz durch das Straßenphotometer von Brodhun (Fig. 93a und b, S. 224 und 225) ersetzt, das so aufgestellt wird, daß der Gipsschirm G von den vertikalen Strahlen senkrecht getroffen wird.

Als seinerzeit die Vorschriften für die Winkelspiegelmethode ausgearbeitet wurden, war man sich darüber klar, daß die mittlere räumliche Lichtstärke J_s, und nicht die mittlere Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse J_m in erster Linie für die Bewertung der Glühlampe maßgebend sei. Nichtsdestoweniger wurde, wie ausdrücklich hervorgehoben wurde, die Bestimmung von J_m nach der Winkelspiegelmethode deshalb empfohlen, weil sich J_s damals nicht in genügend einfacher Weise bestimmen ließ. Der letztere Grund ist heute, besonders seit Einführung des Ulbrichtschen Kugelphotometers (S. 301), nicht mehr stichhaltig, und es muß deshalb jetzt entschieden darauf gedrungen werden, zur Bestimmung von J_s überzugehen.

§ 157. Vorschriften für das Photometrieren des Leuchtgases.

Die meisten Gaswerke haben ein Leuchtgas zu liefern, welches mittels eines bestimmten Schnitt-, Loch- oder Argandbrenners zu untersuchen ist und bei einem vorgeschriebenen Konsum eine einen festgesetzten Wert nicht unterschreitende Lichtstärke entwickeln, oder bei vorgeschriebener Lichtstärke einen unterhalb einer festgesetzten Grenze liegenden Konsum ergeben soll.

Es muß im voraus bemerkt werden, daß die Vorschriften, welche in den einzelnen Ländern zur Herbeiführung eines einheitlichen Meßverfahrens und zur Beseitigung von Mißverhältnissen zwischen Fabrikanten und Konsumenten erlassen sind, heute, wo man es fast ausschließlich mit Gasglühlicht zu tun hat, im Grunde genommen nur noch eine untergeordnete Bedeutung haben, weil für die Gasglühlichttechnik nicht die sogenannte Lichtstärke des Leuchtgases, sondern in erster Linie der Heizwert desselben in Frage kommt (S. 356). Deshalb führen die Gaswerke der Stadt Berlin seit 1903 nur noch Heizwertbestimmungen aus.

---

[1]) Z. f. Bel. 12, 97 (1906).

a) Deutsche Vorschriften. Der Deutsche Verein von Gas- und Wasserfachmännern gibt folgende Vorschriften [1]).

Apparate und Hilfsmittel. Zu benutzen ist das sogenannte Normalphotometer (S. 311) mit einem umlegbaren Lummer und Brodhunschen Photometer oder mit einem Bunsenschen Photometer, dessen Schirm sich umdrehen läßt; ein von der Normal-Eichungs-Kommission geeichter Experimentiergasmesser; ein Druckregulator; eine Sekundenuhr, welche einzelne Sekunden durch einen lauten Schlag angibt, mit Abstellvorrichtung und, wenn möglich, mit einem auf Null zurückstellbaren Sekundenzeiger; eine von der Reichsanstalt beglaubigte Hefnerlampe nebst zuverlässigem Amylacetat; ein Photometerraum, der den auf S. 326 mitgeteilten Vorschriften entspricht.

Die dem Experimentiergasmesser beigegebenen Anweisungen in bezug auf Horizontierung und Füllung, sowie die von der Reichsanstalt herausgegebenen Gebrauchsanweisungen für die Hefnerlampe (im Anhang 5 mitgeteilt) sind genau zu beachten.

Prüfungsmethoden. Es wird unterschieden zwischen amtlicher Prüfung und Kontrollen in den Gaswerken.

Bei der amtlichen Prüfung wird der vorgeschriebene Brenner an dem einen Ende, die Hefnerlampe an dem anderen Ende der Photometerbank fest aufgestellt (Versuchsanordnung 1, S. 311 und 312). Nach Einstellung des vorgeschriebenen Konsums werden im ganzen 10 Einstellungen in Abständen von je einer Minute gemacht. Das Mittel aus den an der zugehörigen Teilung (I, S. 312) abgelesenen Werten gibt die gesuchte Lichtstärke. Bei den Betriebskontrollen verbindet man die Hefnerlampe fest mit dem Photometer (Versuchsanordnung 2), macht kurz hintereinander vier Einstellungen und nimmt aus den an der zweiten Teilung (II) gemachten Ablesungen das Mittel. Nach je fünf bzw. zwei Einstellungen ist der Photometerkopf bzw. das Fettfleckpapier zu drehen.

Wegen der geringen Steifigkeit der Flamme der Hefnerlampe gibt das letztere Verfahren natürlich nur angenäherte Werte.

Allgemeine Vorschriften. Es ist stets der vorgeschriebene Konsum genau einzustellen. Umrechnungen von höheren oder niedrigeren Konsumen auf den vorgeschriebenen sind nicht gestattet. Bei Aufbesserung des Leuchtgases mittels flüssiger Aufbesserungsstoffe soll für aufgebessertes und nicht aufgebessertes Gas je ein eigener Gasmesser verwendet werden.

Vor der Prüfung soll das Gas die Leitung und die Apparate bei vollbrennender Flamme wenigstens eine Viertelstunde lang durchstreichen, so daß Leitung und Apparate vollkommen von Luft befreit sind.

b) Englische Vorschriften. Früher wurde in England die Lichtstärke eines Suggschen Argandbrenners bei einem stündlichen Konsum von 5 Kubikfuß (141,58 Liter) mittels zweier gleichzeitig brennender englischer Kerzen bestimmt, welche in einem Abstande von 6,5 cm voneinander symmetrisch zur Achse der Photometerbank aufgestellt waren. Als Photometer wurde das geschlossene Evanssche benutzt, in welchem die Lichtstärken der zu vergleichenden Lichtquellen durch die Verschlechterung der Luft in unkontrollierbarer Weise beeinflußt wurden.

Nach den neueren, 1898 herausgegebenen Vorschriften der Gas Referees für die Londoner Gasprüfungsämter [2]) werden die 10-Kerzen-Pentanlampe (S. 126) statt der englischen Kerze und das S. 162 beschriebene Photometer verwendet.

---

[1]) J. f. G. u. W. **41**, 828 und 842 (1898).

[2]) Vgl. Referat von Krüss, J. f. G. u. W. **41**, 653 (1898).

Versuchsanordnung. Die Pentanlampe *Pe* (Fig. 182), der zu messende Suggsche Argandbrenner *A* und das Photometer *Ph* sind in einem hinreichend großen Raume frei und fest aufgestellt; die vorschriftsmäßigen Entfernungen sind in der Figur angegeben.

Die photometrische Einstellung wird durch Änderung des Konsums von *A* ausgeführt. *A* hat dann 16 englische Kerzen, wie sich aus der Proportion $1265^2 : 1000^2 = 16 : 10$ ergibt.

Gleichzeitig wird eine Konsumbestimmung von *A* in der Weise ausgeführt, daß die Zeitdauer gemessen wird, in der ein *A* vorgeschalteter Gasmesser zwei volle Umdrehungen macht. Aus dieser sich mit der Beschaffenheit des Leuchtgases ändernden Zeitdauer findet sich unter Berücksichtigung der Ablesung an einem anderen, mit Aerorthometer bezeichneten Apparat (einer Kombination von Luftthermometer und Barometer) aus einer Tabelle die Lichtstärke, welche das Gas bei einem stündlichen Verbrauche von fünf Kubikfuß im Argandbrenner entwickeln würde.

Fig. 182.

Betreffs der Einzelheiten dieser sehr komplizierten und keineswegs einwandfreien Methode wird auf die Referate von Krüss und Leybold[1]) verwiesen.

In ihrer Notification für 1906 schreiben die Gas Referees[2]) statt des Suggschen Brenners einen anderen Brenner, der eine höhere Lichtstärke liefert, und gemäß der Londoner Gasakte von 1905, allerdings nur zu informatorischen Zwecken, auch noch eine Prüfung auf den Heizwert des Gases vor.

c) Holländische Vorschriften. Von der Niederländischen Lichtmeßkommission wurde 1894[3]) als Einheitslampe die Äther-Benzollampe (*AB*-Lampe, S. 130) und statt des Suggschen Argandbrenners die sogenannte Gasnormallampe empfohlen. Diese ist ein 10 mm weiter Einlochbrenner mit einer 100 mm hohen Flamme, von der nur der hellste Teil durch einen rechteckigen Ausschnitt leuchtet.

Versuchsanordnung. Die Gasnormallampe *a* steht fest an dem einen Ende einer 1 m langen Photometerbank, während ein umlegbares Bunsensches Photometer *b* und die mit ihm in 365 mm (= 14″ engl.) fest verbundene *AB*-Lampe *c* verschoben werden. Jede Seite der Photometerbank trägt eine Teilung, welche von 0,40 bis 2,60 geht und nach der Formel

$$p = r^2/300^2$$

berechnet ist, wo *r* der Abstand zwischen *a* und *b* in Millimetern ist.

Da die *AB*-Lampe in 365 mm Entfernung (Tabelle, S. 145) dieselbe Beleuchtung wie die englische Kerze in 300 mm Entfernung hervorbringt, so gibt diese Teilung unmittelbar englische Kerzen an. Jedem Photometer soll eine Tabelle beigegeben werden, aus welcher unmittelbar zu jeder Ablesung *p* diejenige Lichtstärke in englischen Kerzen entnommen werden kann, welche dasselbe Gas in einem Suggschen Argandbrenner erzeugen würde.

Mit Recht weist Krüss darauf hin, daß es manchem Fachmanne unbefriedigend vorkommen muß, daß er mit seinem Instrumente Resultate erzielt, deren Wert sich in englischen Kerzen und im Suggschen Argandbrenner ausdrückt, während er beide nie zu sehen bekommt und selbst kaum in der Lage ist, mittels seines Photometers auf diese Grundlagen zurückzugehen.

---

[1]) J. f. G. u. W. **41**, 653 bzw. 673 (1898).
[2]) Nature **73**, 273 und 354 (1906).
[3]) Referat von Krüss, J. f. G. u. W. **37**, 613 (1894).

d) Französische Vorschriften. Es wird nach Pariser Vorschrift der Bengelbrenner auf die Lichtstärke der Carcellampe gebracht und sein Gasverbrauch gemessen.

§ 158. Vorschriften für die Prüfung von Gasglühlichtkörpern.

Die Lichtmeßkommission des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern hatte bereits 1899[1]) eine vorläufige Anleitung zur Prüfung von Glühkörpern herausgegeben. Auf Grund der seitdem gemachten Erfahrungen, welche namentlich bei den unter Mitwirkung der Reichsanstalt angestellten Versuchen (S. 354) gewonnen wurden, hat sie jene Vorschriften 1901 ergänzt und verbessert. Wir geben diese neueren Vorschriften[2]) im folgenden wieder.

Arten der Glühkörper. Die Glühkörper kommen in zwei Arten vor:

1. abgebrannte (kollodionierte, schellackierte),
2. unabgebrannte (flache).

Behandlung der abgebrannten Glühkörper. Die abgebrannten Glühkörper werden auf einen Haken gehängt und oben angezündet, so daß der schützende Überzug verbrennt.

Behandlung der nicht abgebrannten Glühkörper. Die nicht abgebrannten Glühkörper sind vor allem bis zum Abbrennen vor Feuchtigkeit zu schützen, also in möglichst trockenem Zustande zu beziehen und an trockenem Orte aufzubewahren.

Formen der nicht abgebrannten Glühkörper. Vor dem Abbrennen werden die Glühkörper über ein Formholz derartig gespannt, daß bei aufrechter Stellung desselben die Maschen und die obere Kante des Kopfes möglichst horizontal verlaufen. Etwaige Falten am Kopfe werden durch Herausstreichen geglättet. Die zum Aufhängen des Glühkörpers dienende Asbestschlinge wird durch einen Haken herausgeholt, wobei man den Kopf des Glühkörpers mit der einen Hand umspannt. Damit der Glühkörper später genau senkrecht hängt, ist die Asbestschlinge so zu biegen, daß ihr Knick in die Verlängerung der Achse des Formholzes fällt.

Abbrennen der Glühkörper. Der über dem Formholz gestreckte Glühkörper wird mit einem Haken vom Formholze abgenommen und zum Abbrennen entweder frei oder über dem Brenner aufgehängt; auch empfiehlt sich im ersteren Falle die Aufhängung über einer Glaspyramide, welche das Zusammenklappen des unteren Teiles des Glühkörpers beim Abbrennen verhindert.

Das Abbrennen geschieht mittels einer Bunsenflamme, welche man, am Kopfe des Glühkörpers anfangend, rund um ihn herumführt. Die Verbrennung schreitet dann von oben nach unten gleichmäßig fort; das Baumwollengewebe brennt unter Flammenbildung heraus und das Aschenskelett bleibt zurück. Der Kopf des Glühkörpers muß vollständig abglimmen, bevor man zu der folgenden Operation schreitet.

Formen und Härten des Glühkörpers. Nach erfolgtem Abbrennen wird der Glühkörper gehärtet. Hierzu dient ein mit Preßgas gespeister besonderer, meist durch eine Kappe aus Drahtnetz oben abgeschlossener Bunsenbrenner, bei welchem die Flamme nicht, wie gewöhnlich, nach oben brennt, sondern nach seitwärts gepreßt wird; der hierzu erforderliche Druck ist je nach der Sorte der Glühkörper verschieden.

Anfänglich wird durch sorgfältige Regulierung zunächst ein schwacher Druck gegeben und der an einem Haken gehaltene Glühkörper so weit über

[1]) J. f. G. u. W. **42**, 558 (1899).

[2]) Ebenda **44**, 697 (1901).

den feststehenden Preßgasbrenner gesenkt, daß sein Kopf noch etwa $1^1/_2$ cm von dem Ende des letzteren absteht. Bei verstärktem Drucke forme man dann zunächst den Kopf des Glühkörpers und hebe den Glühkörper dann langsam, so daß er in seiner ganzen Länge die richtige Form erhält. Bei noch stärkerem Drucke hebe und senke man hierauf langsam den Glühkörper mehrmals und härte ihn so. Natürlich kann man auch umgekehrt verfahren und bei feststehendem Glühkörper den Brenner auf- und niederbewegen.

Damit ein nach allen Richtungen gleichmäßiges Leuchten erzielt wird, müssen die Glühkörper so geformt sein, daß sie am Brennerkopf anliegen; ein zu weiter Glühkörper verursacht durch seine Beweglichkeit ein Flackern des Lichtes und beansprucht außerdem zu viel Gas. Ist der gehärtete und geformte Glühkörper noch zu lang, so wird er unten abgeschnitten.

Beschaffenheit der Brenner. Da die Art des Brenners von erheblichem Einflusse auf die Höhe der Lichtstärke sein kann, so sind zu vergleichenden Prüfungen von Glühkörpern immer Brenner der gleichen Konstruktion zu verwenden. Brenner verschiedener Konstruktion geben keine untereinander vergleichbaren Resultate in bezug auf die Leistungen der Glühkörper.

Die zu verwendenden Brenner sind ohne Glühkörper auf gleichmäßiges und regelmäßiges Brennen zu prüfen; besonders der grünblaue Kern der Flamme muß eine gleichmäßige Form haben.

Vor jeder Prüfung ist der Brenner durch Ausblasen von Staub und Schmutz zu befreien.

Der Tragstift soll so hoch sein, daß der Abstand zwischen der oberen Kante des Glühkörpers und der Oberkante des Brenners mindestens 70 mm beträgt.

Der Glaszylinder soll eine Länge von 25 cm haben; es muß ein gerader glatter Zylinder und kein Lochzylinder sein.

Das Einregulieren der Düsen. Die Brennerrohre sollen gleich große Luftzutrittsöffnungen haben, und die Düsen so einreguliert werden, daß bei einem Gasdrucke von 35 bis 40 mm ein stündlicher Verbrauch von 115 bis 130 Litern erzielt wird.

Vor Einregulierung der Düsen, welche, wie üblich, auf einer Rampe angebracht sind und alle unter den gleichen Luft- und Gaszutrittsverhältnissen stehen, läßt man die Glühkörper mindestens eine halbe Stunde auf Brennern von etwa 130 Litern stündlichem Gasverbrauch glühen.

Die Einregulierung der Düsen geschieht dann so, daß man die Düsenöffnungen allmählich erweitert, bis bei einem gleichbleibenden, zwischen 35 und 40 mm liegenden Drucke die größte Lichtwirkung erreicht ist. Zur Kontrolle der richtigen Regulierung ermäßigt man den Druck mittels der Mikrometerschraube des Experimentiergasmessers um etwa 5 mm und überzeugt sich, daß dadurch ein Zurückgehen der Lichtstärke hervorgerufen wird. Hierauf stellt man den richtigen Druck wieder her.

Photometrische Prüfung der Glühkörper. Um ein Urteil über die Lichtstärke einer Glühkörpersorte zu gewinnen, sind mindestens vier Glühkörper dieser Sorte zu photometrieren.

Das Photometrieren geschieht bei demselben Drucke, für welchen die Düsen einreguliert worden sind, nämlich 35 bis 40 mm, und bei einem Gasverbrauche von 115 bis 130 Litern in der Stunde.

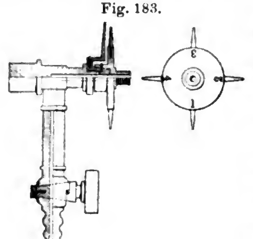
Bevor mit der Lichtstärkenmessung begonnen wird, soll der Glühkörper mindestens fünf Minuten gebrannt haben, damit der ganze Brenner gleichmäßig erwärmt ist.

Es genügt nicht, die Lichtstärke der Glühkörper nur in einer einzigen Richtung zu bestimmen; es ist vielmehr die Messung nach mindestens drei verschiedenen horizontalen Richtungen auszuführen.

Zu diesem Zwecke muß nicht nur der Brennerkopf mit dem Glühkörper, sondern die Düse mit Brennerkopf und Glühkörper gedreht werden. Man bedient sich zweckmäßig hierbei eines kleinen, drehbaren Aufsatzes, dessen Abbildung aus J. f. G. u. W. **47**, 559 (1899) hier wiedergegeben wird (Fig. 183).

Der Aufsatz besteht aus einem feststehenden Konus mit drehbarem Oberteile; letzterer ist hier zum bequemen Einstellen mit Handspeichen und Nummern versehen. Bei dem Drehen wird stets eine Handspeiche auf den feststehenden Arm mittels zweier Finger gestellt.

Fig. 183.



Das Mittel aus den in verschiedenen Richtungen bestimmten Lichtstärken ergibt die mittlere horizontale Lichtstärke des Glühkörpers bei dem gemessenen Druck und Gasverbrauch.

Die Vergleichslichtquelle. Die Lichtquelle, mit deren Lichtstärke diejenige des zu messenden Glühkörpers verglichen wird, darf bei der Messung nicht verschoben werden, sondern sie muß an dem einen Ende der Photometerbank fest aufgestellt werden [1]).

Man kann den Glühkörper direkt mit der Hefnerlampe vergleichen. Es gehört jedoch einige Übung dazu. Ungeübte Beobachter werden zuerst eine außerordentliche Erschwerung der Einstellung durch den Farbenunterschied zwischen der Hefnerlampe und dem Glühkörper empfinden. Nach längerer Übung ist man jedoch imstande, mittels der Hefnerlampe brauchbare Resultate zu erzielen [2]). Allerdings wird bei Messung von Glühkörpern mit einer Lichtstärke von 70 bis 100 HK die Entfernung zwischen der Hefnerlampe und dem Photometerschirme etwas klein, und eine geringe Verschiebung des Photometerschirmes entspricht einer verhältnismäßig großen Veränderung des Messungsresultates [3]). Eine Verlängerung der Photometerbank über die sonst übliche Länge wird aber in den meisten Fällen nicht tunlich sein.

Aus diesen Gründen ist namentlich für längere Untersuchungen die Einschaltung einer Vergleichslampe zu empfehlen. Als solche ist eine kleine elektrische, durch Akkumulatoren gespeiste Glühlampe sehr zweckmäßig. Wo aber eine solche nicht zur Verfügung steht, bietet guten Ersatz auch ein sogenannter Liliput-Gasglühlichtbrenner mit vorgeschaltetem Druckregulator. Derselbe muß, um nicht störenden Veränderungen seiner Lichtstärke während der Versuchsdauer unterworfen zu sein, vor der Benutzung zum Photometrieren mindestens 50 Stunden gebrannt haben.

Die Lichtstärke der Vergleichslampe wird am Anfange und am Ende des Versuches mittels der Hefnerlampe festgestellt. Während der Versuche muß die Vergleichslampe ruhig stehen bleiben [1]) und darf nicht gedreht werden, damit immer die gleiche Lichtausstrahlung zur Wirkung kommt.

Weichen die Anfangs- und Endmessungen der Vergleichslampe allzusehr voneinander ab, so ist natürlich die Versuchsreihe überhaupt nicht zu ge-

[1]) Eine elektrische Glühlampe darf man verschieben (nicht drehen).

[2]) Vgl. S. 229 dieses Buches.

[3]) Vgl. Beispiel 12, S. 391 dieses Buches.

brauchen. Im allgemeinen wird aber bei vorsichtiger Handhabung die erste und die letzte Messung fast dasselbe Resultat ergeben, und das Mittel aus beiden Messungen ergibt dann die Lichtstärke der Vergleichslampe in Hefnerkerzen. Mit dieser Zahl muß die für den untersuchten Glühkörper erhaltene Lichtstärkenzahl multipliziert werden, um seine Lichtstärke ebenfalls in Hefnerkerzen ausgedrückt zu erhalten.

Dauerprüfung der Glühkörper. Über den Wert eines Glühkörpers entscheidet nicht nur seine Anfangslichtstärke, sondern auch die Veränderung der Lichtstärke mit der Zeit. Es gibt Glühkörper, welche am Anfange eine sehr große Lichtstärke haben, nach verhältnismäßig kurzer Brenndauer aber schon erheblich an Lichtstärke verlieren, während andere Glühkörper allerdings mit einer nicht so starken Lichtstärke beginnen, dieselbe aber fast unverändert auf längere Dauer beibehalten.

Um das Verhalten der Glühkörper in dieser Beziehung festzustellen, genügt es, die Messung ihrer Lichtstärke nach einer Brenndauer von 24, von 100 und von 300 Stunden zu wiederholen.

In den Zwischenzeiten müssen die Glühkörper in vorschriftsmäßiger Weise brennen und vornehmlich der Gasdruck auf der vorgeschriebenen Höhe von 35 bis 40 mm bleiben. Es ist also in die Zuleitung zu der für die Dauerversuche dienenden Rampe stets ein Druckregulator von genügender Größe vorzuschalten, der auch während des Abenddruckes die Druckverhältnisse ausgleicht.

Da während des Dauerversuches die Zylinder häufig etwas beschlagen, so ist vor jedem Photometrieren ein reiner Glaszylinder aufzusetzen.

Anhang 1.

Arithmetische Beziehungen.

a) Fehler und Korrektionen. Infolge der Unvollkommenheit unserer Sinneswahrnehmungen und der Meßapparate weicht der durch Beobachtung gefundene Wert b einer Größe von ihrem wahren Werte a mehr oder weniger ab. Es werden nun der Fehler f und die an b anzubringende Korrektion k definiert durch

$$b = a + f;\quad a = b + k, \qquad\qquad 1)$$

so daß
$$f = b - a;\quad k = a - b;\quad k = -f.$$

Beispiel 1. Ein Voltmeter zeige die Spannung $b = 110{,}4$ Volt an; die Korrektion sei $k = 0{,}4$ Volt; alsdann ist die wahre Spannung $a = 110{,}8$ Volt und der Fehler $f = -0{,}4$ Volt.

b) Relative und prozentuelle Änderungen, Unterschiede, Fehler und Korrektionen. Eine Größe u ändere sich um $\varDelta$, so daß die neue Größe

$$v = u + \varDelta \qquad\qquad 2)$$

entsteht. Alsdann ist die in Bruchteilen von u ausgedrückte, sog. relative Änderung von u bzw. der relative Unterschied von v und u

$$n = \frac{\varDelta}{u} \text{ bzw. } = \frac{v-u}{u} \qquad\qquad 3)$$

Die prozentuelle Änderung von u bzw. der prozentuelle Unterschied von v und u

$$p = 100 \frac{\Delta}{u} \text{ bzw.} = 100 \frac{v-u}{u} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 4)$$

Dementsprechend ist in Gl. 1) $100 f/a$ der prozentuelle Fehler von a, $100\ k/b$ die prozentuelle Korrektion von b.

Beispiele (2 bis 5). 2. Ist $u = 17,36$; $\Delta = 0,27$, so ist $n = 0,016$ und $p = 1,6$ Proz.

3. Der prozentische Unterschied von $v = 19,2$ und $u = 14,8$ ist $p = 100\ (19,2 - 14,8)/14,8 = 29,7$ Proz.

4. Für $v = 25,8$ und $u = 30,0$ wird $p = -14,0$ Proz.; das negative Vorzeichen von p deutet an, daß v kleiner als u ist.

5. In Beispiel 1 ist der prozentuelle Fehler $-0,4$ Proz., die prozentuelle Korrektion $+0,4$ Proz.

Ändert sich u um p Proz., so erhält man

$$v = u + \frac{u}{100}, p = u\left(1 + \frac{p}{100}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \quad 5)$$

Beispiele (6 bis 8). 6. Um $p = 5,8$ Proz. größer als $u = 16,0$ ist $v = 16,0 + 0,160 \times 5,8 = 16,928$ oder rund 16,93.

7. Um 1,6 Proz. kleiner als 772 ist 759,6.

8. Durch Beobachtung sei gefunden die Größe $u = 12,41$ bzw. 80,24; sie soll auf 1 Proz. genau sein. Alsdann liegt der wahre Wert v zwischen 12,29 und 12,53 bzw. 79,44 und 81,04. Demnach ist in u im ersten Falle die vierte Ziffer nicht verbürgt, dagegen die dritte nahezu verbürgt, während im zweiten Falle erst die zweite Ziffer verbürgt ist. Man sollte deshalb nur drei Ziffern angeben, also schreiben $v = 12,4$ bzw. 80,2, weil man sonst den Eindruck einer zu großen Genauigkeit erweckt.

Nun kann man mit Berücksichtigung aller Fehlerquellen eine Lichtstärke im günstigsten Falle auf 1 Proz. genau bestimmen. Deshalb sollte man, wie es die Reichsanstalt in ihren Prüfungsscheinen tut, im Meßergebnis Lichtstärkenwerte nur in drei Ziffern angeben, wobei die einen Dezimalbruch beginnenden Nullen nicht mitgerechnet werden; so sollte man gegebenenfalls z. B. schreiben

$$u = 0,361;\ 25,3;\ 716;\ 2490\ \text{HK}.$$

Nur wenn es sich, wie im Beispiel 9, um vergleichende Messungen handelt, und die Genauigkeit überall die gleiche ist, empfiehlt es sich auch noch die vierte Ziffer mitzuteilen.

Natürlich muß die zur Ermittelung der Lichtstärke (oder einer anderen Größe) dienende Rechnung, auch wenn man das Ergebnis schließlich auf drei Ziffern abrundet, genau sein; man hat deshalb, falls man keine Rechenmaschine oder Rechentabellen zur Verfügung hat, mindestens vierstellige Logarithmentafeln zu benutzen. (S. Aufgabe 3, S. 392.)

Beispiel 9. Eine elektrische Glühlampe besitzt bei $v_1 = 110,0$ Volt die Lichtstärke $J_1 = 16,14$ HK; bei $v_2 = 112,0$ Volt ergab sich $J_2 = 17,75$ HK. Nun ist v_2 um 1,8 Proz. größer als v_1, J_2 um 10,0 Proz. größer als J_1. Einer Zunahme der Spannung um 1 Proz. entspricht also hier eine Zunahme der Lichtstärke um 5,6 Proz.

c) Rechnen mit kleinen Größen. Annäherungsformeln. Ist δ eine gegen 1 so kleine Größe, daß die Glieder mit $\delta^2, \delta^3 \ldots$ vernachlässigt werden können, so ist nach dem binomischen Satze

$$(1 + \delta)^m = 1 + m\delta;\ (1 - \delta)^m = 1 - m\delta \quad \ldots \ldots \quad 6)$$

Hierfür kann man zusammenfassend schreiben

$$(1 \pm \delta)^m = 1 \pm m\delta \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 6a)$$

Demnach ist

$$\left.\begin{array}{l}(1 \pm \delta)^2 = 1 \pm 2\delta;\ \sqrt{1 \pm \delta} = 1 \pm \frac{1}{2}\delta;\ \frac{1}{1 \pm \delta} = 1 \mp \delta; \\ \frac{1}{(1 \pm \delta)^2} = 1 \mp 2\delta;\ \frac{1}{\sqrt{1 \pm \delta}} = 1 \mp \frac{1}{2}\delta.\end{array}\right\} \quad \ldots \quad 7)$$

Sind δ, δ', δ'' ... gegen 1 so kleine Größen, daß die Produkte $\delta\delta'$, $\delta\delta''$ ... gegen 1 vernachlässigt werden können, so ist

$$(1 \pm \delta)(1 \pm \delta')(1 \pm \delta'')\cdots = 1 \pm \delta \pm \delta' \pm \delta'' \pm \cdots \quad 8)$$

$$\frac{(1 \pm \delta)(1 \pm \delta')\ldots}{(1 \pm \delta'')(1 \pm \delta''')\ldots} = 1 \pm \delta \pm \delta' \pm \cdots \mp \delta'' \mp \delta''' \mp \cdots \quad 9)$$

Wird in den Gl. 6) bis 9) links das obere Vorzeichen genommen, so gilt rechts gleichfalls das obere; entsprechendes gilt für das untere Vorzeichen.

Sind p_1 und p_2 zwei wenig verschiedene Größen, so kann man statt des geometrischen Mittels das arithmetische setzen, also

$$\sqrt{p_1 \cdot p_2} = \frac{1}{2}(p_1 + p_2) \quad \ldots \quad 10)$$

Beweis. Setzt man $p_1 = p + \delta$, $p_2 = p - \delta$, so daß p das arithmetische Mittel von p_1 und p_2 ist, so ist $\sqrt{p_1 \cdot p_2} = \sqrt{p^2 - \delta^2} = p\sqrt{1 - \delta^2/p^2}$ $= p(1 - 0{,}5\,\delta^2/p^2)$, wo $0{,}5\,\delta^2/p^2$ gegen 1 zu vernachlässigen ist.

Es sei gegeben [vgl. Gl. 1) bis 3)] S. 177

$$p = \frac{r\,r'}{r_1\,r_1'}, \quad \ldots \quad 11)$$

wo r wenig von r', ferner r_1 wenig von r_1' abweicht. Alsdann läßt sich schreiben

$$\left.\begin{array}{l} p = \frac{(\sqrt{r \cdot r'})^2}{(\sqrt{r_1 \cdot r_1'})^2} = \frac{\{0{,}5\,(r + r')\}^2}{\{0{,}5\,(r_1 + r_1')\}^2}; \\ p = \sqrt{\left(\frac{r}{r_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{r'}{r_1'}\right)^2} = \frac{1}{2}\left\{\left(\frac{r}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{r'}{r_1'}\right)^2\right\} \end{array}\right| \quad \ldots \quad 12)$$

Anwendung auf eine Formel. Zwischen den Größen y und x bestehe die Beziehung

$$y = c\,x^n, \quad \ldots \quad 13)$$

wo c und n Konstanten sind. Ändert sich x um die relativ kleine Größe δ, so ändert sich y um die relativ kleine Größe [1])

$$\Delta = n\,c\,x^{n-1}\,\delta \quad \ldots \quad 14)$$

Die relative bzw. prozentuelle Änderung von y ist also [2])

$$\frac{\Delta}{y} = \frac{n\,\delta}{x} \text{ bzw. } 100\,\frac{\Delta}{y} = 100\,\frac{n\,\delta}{x} \quad \ldots \quad 15)$$

Beweis von Gl. 14). Es ist

$$\begin{aligned} y + \Delta &= c\,(x + \delta)^n = c\,x^n(1 + \delta/x)^n = c\,x^n(1 + n\,\delta/x) \\ &= c\,x^n + n\,c\,x^{n-1}\,\delta. \end{aligned}$$

---

[1]) Am schnellsten erhält man Gl. 14), wenn man Gl. 13) nach x differenziert, also $dy = n\,c\,x^{n-1}\,dx$ bildet, und dy sowie dx durch Δ und δ ersetzt.

[2]) Am schnellsten erhält man Gl. 15), wenn man Gl. 13) logarithmiert, also $\log y = \log c + n \log x$ bildet, diese Gleichung nach x differenziert, wodurch $dy/y = n\,dx/x$ sich ergibt, und dy sowie dx wieder durch Δ und δ ersetzt. *(Logarithmisches Differenzieren.)*

Zieht man hiervon Gl. 13) ab, so erhält man Gl. 14).

Beispiel 10. Die Lichtstärke J ($= y$) des schwarzen Körpers ist bei der absoluten Temperatur θ ($= x$) $= 1900^\circ$ der 14. Potenz von x proportional (S. 95); es ist also $n = 14$. Einer Änderung von θ um 1 Proz. ($100\,\delta/\theta = 1$, also $\delta = 19^\circ$) entspricht also eine Änderung von J um 14 Proz.

Beispiel 11 Die eben erwähnte Temperatur θ ist der vierten Wurzel aus dem Gesamtemissionsvermögen H proportional (Gesetz I, S. 44). Da $n = 1/4$ ist, so bedingt eine gewisse prozentuelle Änderung von H eine viermal so kleine Änderung von θ. (Vgl. S. 420.)

Anwendung auf eine zweite Formel. Die Größe y hänge mit r_1 und r_2 durch die Formel

$$y = c\,\frac{r_2^2}{r_1^2} \quad \text{16)}$$

zusammen, wo c wieder eine Konstante ist. Ändern sich r_2 und r_1 um die relativ kleinen Größen ξ_2 und ξ_1, so ändert sich y [1]) um

$$\varDelta = 2\,y\left(\frac{\xi_2}{r_2} - \frac{\xi_1}{r_1}\right) \quad \text{17)}$$

Mithin ist die prozentuelle Änderung von y [1]), welche wir mit $\mathfrak{F}$ bezeichnen wollen,

$$\mathfrak{F} = 100\,\frac{\varDelta}{y} = 200\left(\frac{\xi_2}{r_2} - \frac{\xi_1}{r_1}\right) \quad \text{18)}$$

Beweis von Gl. 17). Es ist

$$y + \varDelta = c\,\frac{(r_2 + \xi_2)^2}{(r_1 + \xi_1)^2} = c\,\frac{r_2^2\,(1 + \xi_2/r_2)^2}{r_1^2\,(1 + \xi_1/r_1)^2} = c\,\frac{r_2^2}{r_1^2}\left(1 + 2\,\frac{\xi_2}{r_2}\right)\left(1 - 2\,\frac{\xi_1}{r_1}\right)$$
$$= y\left(1 + 2\,\frac{\xi_2}{r_2} - 2\,\frac{\xi_1}{r_1}\right) = y + 2\,y\left(\frac{\xi_2}{r_2} - \frac{\xi_1}{r_1}\right),$$

woraus sich obiges $\varDelta$ ergibt, da sich y auf beiden Seiten forthebt.

Aufgabe 1. Die beiden vertikal montierten Lampen L_1 und L_2 sowie das Lummer-Brodhunsche Photometer P sollen sich auf einer geraden Photometerbank befinden. L_1 besitze in Richtung der Bankachse $L_1 P$ die konstante Lichtstärke J_1. Die Lampe L_2 lasse sich um ihre Achse drehen. Bei einer gewissen Stellung von L_2, also in einer gewissen Ausstrahlungsrichtung, sollen sich bei der photometrischen Einstellung die Abstände r_1 und r_2 ergeben. Alsdann ist nach Gl. 6) S. 178 die Lichtstärke von L_2 in dieser Richtung

$$J_2 = c'\,\frac{r_2^2}{r_1^2}\,J_1 \quad \text{19)}$$

Setzt man in Gl. 19) die Konstante $c' J_1 = c$, so geht dieselbe über in Gl. 16).

In einer anderen Ausstrahlungsrichtung möge man die Abstände $r_2 + \xi_2$, $r_1 + \xi_1$ erhalten. Es werde gefragt, um wieviel Prozent $\mathfrak{F}$ die Lichtstärke in der zweiten Ausstrahlungsrichtung von der in der ersten verschieden ist. Hierbei sollen die drei folgenden Versuchsanordnungen, von denen schon auf S. 163 und 311 ff. die Rede war, berücksichtigt werden.

Versuchsanordnung 1. L_2 und L_1 stehen fest, P wird verschoben. Dann ist $r_2 + r_1 = l$; $r_2 + \xi_2 + r_1 + \xi_1 = l$, so daß $r_1 = l - r_2$; $\xi_1 = -\xi_2$, wo l eine Konstante, nämlich der Abstand $L_2 L_1$, ver-

[1]) Am schnellsten erhält man Gl. 17) und 18) wieder durch Differentiation bzw. logarithmische Differentiation von Gl. 16).

mindert um die im allgemeinen zu vernachlässigende Dicke des Photometerschirmes ist (vgl. das Beispiel auf S. 310 und 311). Mithin wird Gl. 18) zu

$$\mathfrak{F} = 200\left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{l - r_2}\right)\xi_2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 20)$$

Beispiel 12. Es sei $l = 2500$ mm; dann ist für

$$r_2 = 1250 \quad \begin{cases}1500\\ \text{oder}\\ 1000\end{cases} \quad \begin{cases}1750\\ \text{oder}\\ 750\end{cases} \quad \begin{cases}2000\\ \text{oder}\\ 500\end{cases} \quad \begin{cases}2250\\ \text{oder}\\ 250\end{cases}$$

$$\mathfrak{F} = 0{,}32\,\xi_2, \quad 0{,}33\,\xi_2, \quad 0{,}38\,\xi_2, \quad 0{,}50\,\xi_2, \quad 0{,}89\,\xi_2 \text{ Proz.}$$

Bei gleichem ξ_2 ist $\mathfrak{F}$ also am kleinsten für $r_2 = 1250$ mm (P in der Mitte zwischen L_1 und L_2; J_1 nahezu $= J_2$); $\mathfrak{F}$ bleibt praktisch konstant, wenn r_2 bis 1500 mm zunimmt (bzw. 1000 mm abnimmt) und ist für $r_2 = 2250$ (bzw. 250) mm nahezu dreimal so groß wie für $r_2 = 1250$ mm.

Für $l = 2500$ mm und $r_2 =$ etwa 1500 bzw. 2250 mm entspricht also einer Änderung $\xi = 1$ mm die Änderung $\mathfrak{F} = 0{,}33$ bzw. 0,89 Proz., demnach dem Werte $\mathfrak{F} = 1$ Proz. die Änderung $\xi_2 = 3{,}0$ bzw. 1,1 mm.

Ergab sich für $l = 2500$ mm in einer Ausstrahlungsrichtung $r_2 = 1518{,}6$ in einer anderen $r_2 + \xi_2 = 1525{,}9$ mm, also $\xi_2 = 7{,}3$ mm, so ist die Lichtstärke in der zweiten Richtung um $0{,}33 \times 7{,}3 = 2{,}4$ Proz. größer als in der ersten.

Versuchsanordnung 2. L_2 steht fest, während L_1 und P miteinander verbunden sind und zugleich verschoben werden. In diesem Falle ist $r_1 = const$, also $\xi_1 = 0$; r_2 veränderlich. Mithin geht Gl. 18) über in

$$\mathfrak{F} = 200\,\xi_2/r_2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 21)$$

Beispiel 13. Es wird für

$$\begin{array}{lllll} r_2 = 400 & 1000 & 2000 & 2284 \text{ mm} \\ \mathfrak{F} = \xi_2/2 & \xi_2/5 & \xi_2/10 & \xi_2/11{,}4 \text{ Proz.} \end{array}$$

$r_2 = 1000$ bzw. 2000 mm gibt $\mathfrak{F} = 1$ Proz. für $\xi_2 = 5{,}0$ bzw. 10,0 mm.

War in einer Ausstrahlungsrichtung $r_2 = 2284$, in einer anderen $\xi_2 = -37$ mm, so ist die Lichtstärke in der zweiten Ausstrahlungsrichtung um $37/11{,}4 = 3{,}2$ Proz. kleiner als in der ersteren.

Versuchsanordnung 3. L_2 und P stehen fest, während L_1 verschoben wird. Hier ist $r_2 = const$, also $\xi_2 = 0$; r_1 veränderlich, so daß Gl. 18) übergeht in

$$\mathfrak{F} = -200\,\xi_1/r_1 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 22)$$

Beispiel 14. Für $r_1 = 760$ mm entspricht einer Änderung um $\mathfrak{F} = 1$ Proz. eine Änderung $\xi_1 = -3{,}8$ mm.

Aufgabe 2. Aufgabe 1 werde dahin abgeändert, daß ξ_2 und ξ_1 die Fehler bezeichnen, um welche die Abstände r_2 und r_1 unrichtig gemessen werden. Alsdann gibt Gl. 18) allgemein den Fehler $\mathfrak{F}$, um welchen man J_2 nach Gl. 19) unrichtig berechnet.

Wir wollen uns hier nur mit der in der Praxis am gebräuchlichsten Versuchsanordnung 1 beschäftigen. Rühren die Meßfehler von einer ungenauen Herstellung der Photometerbank und der Photometerwagen (bzw. -Schlitten) her — Fehler, welche eigentlich nicht vorkommen dürften —, so wird man den Abstand $L_2 L_1$ möglichst groß wählen, da $\mathfrak{F}$ für gleiche Werte von ξ_2 und ξ_1 um so kleiner ist, je größer r_2 und r_1 sind. Im allgemeinen wird man hierbei L_1 von solcher Stärke wählen oder L_2 meßbar derart schwächen, daß man möglichst nahe der Mitte zwischen L_1 und L_2 das Photometer einstellt (vgl. Beispiel 12). Rühren die Meßfehler von der Ver-

nachlässigung der Dicke d des Photometerschirmes her (Fig. 150, S. 311), so ist $\xi_2 = \xi_1 = {}^1\!/_2\, d$, so daß

$$\mathfrak{F} = \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right) 100\, d\,; \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 23)$$

hier ist für die Mitte zwischen L_1 und L_2 ($r_1 = r_2$) $\mathfrak{F} = 0$, und es wird $\mathfrak{F}$ um so größer, je ungleicher r_1 und r_2 werden.

Aufgabe 3. In Aufgabe 1 sollen ξ_1 und ξ_2 die Zehntelmillimeter bezeichnen, welche man vernachlässigt, indem man die auf Zehntelmillimeter abgelesenen r_2 und r_1 auf ganze Millimeter abrundet; z. B. ist $\xi_2 = +0{,}4$ mm, wenn man r_2 von 1747,6 auf 1748 mm abrundet. Dem Maximalwerte $\xi_2 = 0{,}5$ mm würde bei der Versuchsanordnung 1 und bei $l = 2500$ mm für $r_2 =$ etwa 1250 bzw. 2250 mm ein Fehler in J_2 von 0,16 bzw. 0,45 Proz. (Beispiel 12), bei der Versuchsanordnung 2 für $r_2 = 1000$ bzw. 2000 mm ein Fehler in J_2 von 0,1 bzw. 0,05 Proz. (Beispiel 13) entsprechen. Zu diesem Fehler kommt noch derjenige, welcher entsteht, wenn man den nach Gl. 19) berechneten vierzifferigen Wert von J_2 auf drei Ziffern abrundet. Für gewöhnlich erreichen beide Fehler zusammen nicht den Betrag von 1 Proz.

Für die meisten Zwecke der Praxis genügt es, die r auf ganze Millimeter abzurunden und mit vierstelligen Logarithmen zu rechnen. Vielfach wird in der Praxis mit zu vielen Ziffern gerechnet, also auf das Rechnen eine überflüssige Sorgfalt verwandt, während andere wichtigere Erfordernisse, z. B. das Abblenden von fremdem Licht, das Konstanthalten der Vergleichslampe, nicht genügend berücksichtigt werden.

Aufgabe 4. L_2 und L_1 sollen nacheinander mit der in fester Verbindung mit dem Photometer befindlichen Vergleichslampe (Bunsens Substitutionsmethode, S. 167) verglichen werden. Sind r_2 und r_1 die hierbei gefundenen Abstände, so ist

$$J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} J_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 24)$$

Es sollen jetzt ζ_2 und ζ_1 die Fehler sein, um welche man r_2 und r_1 infolge der Unsicherheit der photometrischen Einstellung unrichtig einstellt. Alsdann ist der Fehler in J_2 bei der Messung von L_2 bzw. L_1 analog Gl. 21) und 22)

$$\mathfrak{F}_2 = 200\, \zeta_2 / r_2; \quad \mathfrak{F}_1 = -200\, \zeta_1 / r_1 \quad \ldots\ldots \quad 25)$$

Mittels der entwickelten Formeln 14) bis 25) kann man die Änderungen und Fehler von Größen also unmittelbar bestimmen, ohne daß man die absoluten Werte dieser Größen zu berechnen braucht.

Anhang 2.

Geometrische Beziehungen.

a) Gewöhnlicher Winkel. Ein gewöhnlicher Winkel ABC (Fig. 184) wird außer in *Gradmaß* (Bogengraden, Bogenminuten, Bogensekunden) auch noch in *Bogenmaß* oder, wie man es auch nennt, in *absolutem Maß* als das Verhältnis

$$\frac{l}{r} = \frac{l_1}{1} = l_1$$

gemessen, wo l und l_1 die zu den Radien r und 1 gehörigen Kreisbögen sind.

In letzterem Falle ist also der Winkel eine reine Zahl (Dimension Null) Derselbe kann durch den Bogen l_1 dargestellt werden.

Allgemein ist ein Winkel, der gleich α Bogengrad ist, da $l = 2 r \pi \alpha/360$ ist, in absolutem Maße gleich

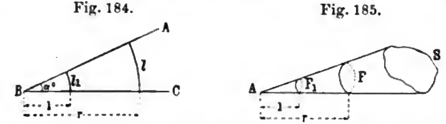
$$\frac{2\pi}{360}\alpha, \text{ wo } \frac{2\pi}{360} = 0{,}01745 \text{ ist.}$$

Speziell ist der Winkel

1	$\pi/4$	$\pi/2$	π	2π	in absolutem Maß
gleich $57{,}3^0$ $(l = r)$	45	90	180	360^0	in Gradmaß.

b) Räumlicher Winkel. Läßt man einen von einem Punkte A (Fig. 185) ausgehenden, beweglichen Leitstrahl (radius vector) längs der Begrenzung

Fig. 184. Fig. 185.



einer beliebig gestalteten Fläche S hingleiten, so erhält man eine kegelförmige Oberfläche. Den von dieser eingeschlossenen Raum nennt man einen *räumlichen Winkel* und A dessen Scheitel. Man beschreibe nun um A als Mittelpunkt eine Kugelfläche mit dem Radius r und eine solche mit dem Radius 1 (*Einheitskugel*, S. 28). Es seien F und F_1 die Flächen, welche der erwähnte Kegel aus diesen beiden Kugelflächen herausschneidet. Alsdann bezeichnet der Ausdruck

$$\omega = \frac{F}{r^2} = \frac{F_1}{1} = F_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

die *Größe des räumlichen Winkels.*

ω ist eine reine Zahl und kann durch die Fläche F_1 gemessen werden.

In der praktischen Photometrie mißt man den Radius in Metern, demnach F und F_1 in Quadratmetern (vgl. S. 28). Mithin ist ein räumlicher Winkel gleich 1, wenn $F_1 = 1$ qm ist.

Ein gerader kreisförmiger Kegel, dessen erzeugende Gerade mit seiner Achse den Winkel ϑ einschließt, dessen Öffnungswinkel also 2ϑ ist, hat demnach den räumlichen Winkel

$$\omega = 2\pi\,(1 - \cos\vartheta) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Ist $\vartheta = 90^0$, so wird

$$\omega = 2\pi; \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

in diesem Falle ist die Mantelfläche eine Ebene; der kegelförmige Raum ist also die Hälfte des ganzen Raumes, und die zugehörige Fläche F_1 die auf dieser Ebene aufstehende Halbkugel.

Ist $\vartheta = 180^0$, so wird

$$\omega = 4\pi; \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

in diesem Falle füllt der räumliche Winkel den ganzen Raum aus und wird deshalb ein voller genannt.

Ein Punkt L sei von dem Flächenelemente s um die Strecke r entfernt, und es bilde r mit dem Lote auf s den Winkel i (vgl. Fig. 5, S. 29). Konstruiert man den räumlichen Winkel, unter welchem s von L erscheint, so schneidet derselbe aus der um L mit dem Radius r beschriebenen Kugel die

Fläche $F = s \cos i$, welche als die rechtwinkelige Projektion von s angesehen werden kann, heraus; denn wegen der unendlich kleinen Dimensionen kann man sowohl s als auch F als eben ansehen, mithin ist die Größe des räumlichen Winkels — vgl. Gl. 7), S. 30 und Gl. 5), S. 33 —

$$\omega = \frac{s \cos i}{r^2} \quad \text{. . . . .} \quad 5)$$

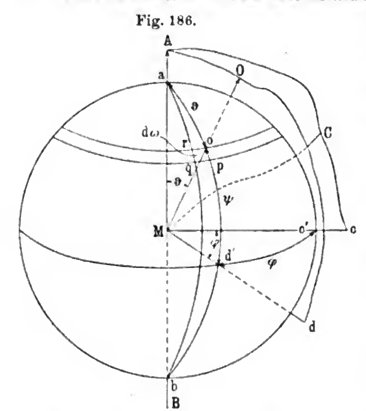
c) Sphärische Koordinaten. Eine Richtung MO ist gegeben, sobald die beiden folgenden Bestimmungsstücke bekannt sind (Fig. 186):

1. der Winkel ϑ, welchen MO mit einer festen Richtung MA bildet;

2. der Neigungswinkel φ der Ebene AMO gegen eine feste Ebene AMC, also $\measuredangle\, dMc$, wo Md in der Ebene AMO senkrecht auf MA, ferner Mc in der Ebene AMC senkrecht auf MA steht.

In der Photometrie wird als feste Richtung MA gewöhnlich die Lampenachse (S. 268) oder die Senkrechte auf einem Flächenelement (vgl. S. 90) genommen.

Fig. 186.



Wir beschreiben um M eine Einheitskugel, welche von den Linien MA, Mc, Md, MO in den Punkten a, c', d', o geschnitten wird. Wie auf der Erde wollen wir auf der Einheitskugel **Meridiane** und **Parallel- oder Breitenkreise** einführen. Als **Pol** werde dabei der Punkt a, als **Gegenpol** der a diametral gegenüberliegende Punkt b und als Anfangsmeridian der durch c' gehende Meridian genommen. Auf dieser Kugel bezeichnen $\vartheta = \measuredangle\, aMo$ die *Poldistanz* und $\varphi = \measuredangle\, c'Md'$ die *Länge* des Punktes o, und zwar kann ϑ durch den Meridianbogen ao, φ durch den Äquatorbogen $c'd'$ gemessen werden. In Gradmaß ist also ϑ von 0 bis 180°, in absolutem Maße von 0 bis π veränderlich; ebenso ist φ veränderlich von 0 bis 360° bzw. 0 bis 2π.

Die **Breite** ψ des Punktes o ist gleich $\measuredangle\, oMd'$; ψ kann gemessen werden durch den Meridianbogen od', und zwar werde ψ für Punkte zwischen Äquator und Pol positiv, für Punkte zwischen Äquator und Gegenpol negativ gezählt. In Bogenmaß ist ψ von -90 bis $+90°$, in absolutem Maße von $-\pi/2$ bis $+\pi/2$ veränderlich, und es ist allgemein $\psi = 90° - \vartheta$ bzw. $= \pi/2 - \vartheta$.

Flächenelemente. Häufig denkt man sich die Einheitskugel durch unendlich nahe Parallelkreise und unendlich nahe Meridiane in Elemente zerlegt. Auf diese Weise werde bei o das rechtwinkelige Element $d\omega = opqr$ herausgeschnitten, und es seien in absolutem Maße die sphärischen Koordinaten von

$$o : \vartheta,\ \varphi; \quad p : \vartheta + d\vartheta,\ \varphi; \quad q : \vartheta + d\vartheta,\ \varphi + d\varphi; \quad r : \vartheta,\ \varphi + d\varphi.$$

Nun ist or der Bogen des Parallelkreises, dessen Poldistanz ϑ, dessen Zentriwinkel $d\varphi$ und dessen Radius $\sin\vartheta$ ist, so daß $or = \sin\vartheta\, d\varphi$. Ferner

ist op der Bogen des Meridians, dessen Zentriwinkel $d\vartheta$ ist, so daß $op = d\vartheta$. Mithin ist

$$d\omega = or \cdot op = \sin\vartheta\, d\vartheta\, d\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Entsprechend ist

$$d\omega = \cos\psi\, d\psi\, d\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6\text{a})$$

d) Brechung eines räumlichen Winkels. Es möge die Ebene des Äquators (Fig. 186) oder auch nur ein Element desselben am Orte des Mittelpunktes M die Grenze zweier verschieden stark brechender Mittel I und II sein, deren absolute Brechungsexponenten n_1 und n_2 seien (S. 17). Ferner möge das oben erwähnte rechtwinkelige Element $d\omega$ im Mittel I liegen und durch M Strahlen ins Mittel II senden.

Jedoch wollen wir jetzt die Poldistanz von o, in Übereinstimmung mit späteren Bezeichnungen, mit α statt mit ϑ bezeichnen; alsdann ist α der Einfallswinkel für die Strahlen oM. Ferner sei β der zugehörige Brechungswinkel, und die Brechung erfolge nach dem Snelliusschen Gesetze (S. 17)

$$n_1 \sin\alpha = n_2 \sin\beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

Die von der Begrenzung von $d\omega$ ausgegangenen Strahlen schneiden dann im Mittel II, also nach ihrer Brechung, aus der Einheitskugel das ebenfalls rechtwinkelige Element heraus

$$d\omega' = o'p'q'r' = \sin\beta\, d\beta\, d\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Denn o' und p' liegen auf dem Meridian, welcher dem durch o und p gehenden diametral gegenüberliegt; ebenso liegen q' und r' auf dem Meridian, welcher dem durch q und r gehenden diametral gegenüberliegt. Die Poldistanz von o' und r' ist $\pi - \beta$, die von p' und q' ist $\pi - \beta - d\beta$.

Durch Differentiation von Gl. 7) ergibt sich

$$n_1 \cos\alpha\, d\alpha = n_2 \cos\beta\, d\beta, \text{ so daß } d\alpha/d\beta = n_2 \cos\beta / n_1 \cos\alpha \quad . \quad . \quad 7\text{a})$$

Mithin wird nach Gl. 6) bis 8)

$$\frac{d\omega}{d\omega'} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\frac{d\alpha}{d\beta} = \frac{n_2}{n_1}\frac{d\alpha}{d\beta} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

Bei der Ableitung dieser Gleichung hatten wir vorausgesetzt, daß $d\omega$ und deshalb auch $d\omega'$ rechtwinkelig seien. Die Gleichung gilt aber auch für jede beliebige Gestalt von $d\omega$, wovon man sich überzeugt, wenn man $d\omega$ in lauter unendlich kleine rechtwinkelige Elemente $d^2\omega$ zerlegt; alsdann ist, wenn $d^2\omega'$ zu $d^2\omega$ gehört, $d^2\omega = d^2\omega' \, (n_2/n_1)^2 \, \cos\beta/\cos\alpha$, und nach Integration treten $d\omega$ und $d\omega'$ an Stelle von $d^2\omega$ und $d^2\omega'$.

Nun sind $d\omega$ und $d\omega'$ die räumlichen Winkel, unter welchen die Flächenelemente $d\omega$ und $d\omega'$ von M aus erscheinen. Mithin kann man auch sagen:

Beim Übergange aus dem Mittel I in das Mittel II wird der räumliche Winkel $d\omega$ in den räumlichen Winkel $d\omega'$ gemäß Gl. 9) gebrochen. Hierbei ist α der Einfallswinkel für einen beliebigen einfallenden Strahl und β der zugehörige Brechungswinkel.

Anhang 3.

Auftreffen von Licht auf sog. durchsichtige Körper.

Im Anschlusse an § 8 wollen wir uns jetzt eingehender mit den quantitativen Änderungen beschäftigen, welche ein paralleles, homogenes (einfarbiges) Lichtbündel [1]) von unendlich kleinem Querschnitte erfährt, wenn es aus einem nicht, oder doch nur schwach (nicht metallisch) absorbierenden Mittel auf ein ebensolches, von vollkommen glatten Flächen begrenztes Mittel, also auf ein *durchsichtiges* Mittel, fällt und teils regelmäßig reflektiert, teils regelmäßig gebrochen wird. Zu diesem Zwecke müssen wir die unter a) und b) mitgeteilten Gesetze voranschicken. Zum Schlusse wollen wir einige andeutende Bemerkungen machen für den Fall, daß das Bündel total oder von einer Metallfläche reflektiert wird. Unsere Entwickelungen gelten zunächst nur für die objektive Lichtmenge; sie lassen sich jedoch unmittelbar auch auf den ihr proportionalen physiologischen Lichtstrom übertragen.

a) Fresnelsches Reflexionsgesetz [2]).

Im Medium I falle auf die der Einfachheit wegen als eben vorausgesetzte Oberfläche von II (die Vorderfläche ab von Fig. 2, S. 17) unter dem Einfallswinkel α die Lichtmenge 1; β sei der zugehörige Brechungswinkel und n der Brechungsexponent von II gegen I (S. 17), so daß nach dem Snelliusschen Gesetze $\sin\alpha = n \sin\beta$.

Das einfallende Bündel schwinge entweder senkrecht oder parallel zur Einfallsebene (kürzer: $\perp$ oder $\parallel E\text{-}E$). Alsdann wird nach Fresnel

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{r}_s &= \frac{\sin^2(\alpha-\beta)}{\sin^2(\alpha+\beta)} \text{ bzw. } \mathfrak{r}_p = \frac{tg^2(\alpha-\beta)}{tg^2(\alpha+\beta)} \text{ reflektiert,} \\ \mathfrak{d}_s &= 1-\mathfrak{r}_s \qquad\quad \text{ bzw. } \mathfrak{d}_p = 1-\mathfrak{r}_p \text{ gebrochen} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 1)$$

Die Gleichungen gelten auch, wenn das Bündel in II unter β auf die Oberfläche von I auftrifft und unter α in das Medium I gebrochen wird.

Für senkrechtes Auffallen, d. h. für $\alpha = 0$, folgt hieraus

$$\mathfrak{r}_s = \mathfrak{r}_p = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2; \; \mathfrak{d}_s = \mathfrak{d}_p = \frac{4n}{(n+1)^2} \quad \ldots\ldots \quad 2)$$

Fällt das Bündel unter dem Polarisationswinkel (kurz P.-W.) α' auf, so ist nach Brewster $tg\,\alpha' = n$ (vgl. S. 203). Alsdann wird

$$\mathfrak{r}_s = \left(\frac{n^2-1}{n^2+1}\right)^2; \; \mathfrak{d}_s = \frac{4n^2}{(n^2+1)^2}; \; \mathfrak{r}_p = 0; \; \mathfrak{d}_p = 1 \quad \ldots\ldots \quad 3)$$

Für streifende Inzidenz, d. h. für $\alpha = 90^\circ$, wird

$$\mathfrak{r}_s = \mathfrak{r}_p = 1; \; \mathfrak{d}_s = \mathfrak{d}_p = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Beispiel 1. Es sei $n = 1{,}5$ (Glas). Dann ist der P.-W. $\alpha' = 56{,}3^\circ$, und es ergibt sich für

---

[1]) Unsere Betrachtungen gelten übrigens auch für die nicht sichtbaren Wellenlängen.

[2]) Ann. Chim. Phys. (2) **17**, 190 (1821); (2) **46**, 225 (1823).

α =	0	15	30	45	56,3	60	75	90°
$\mathfrak{r}_s$ =	0,040	0,044	0,058	0,092	0,148	0,177	0,399	1,000
$\mathfrak{r}_p$ =	0,040	0,036	0,025	0,008	0,000	0,002	0,107	1,000
$\mathfrak{d}_s$ =	0,960	0,956	0,942	0,908	0,852	0,823	0,601	0,000
$\mathfrak{d}_p$ =	0,960	0,964	0,975	0,992	1,000	0,998	0,893	0,000

Von einer senkrecht auf eine Glasfläche auffallenden Lichtmenge werden also 4 Proz. reflektiert, 96 Proz. gebrochen. Falls nur das gebrochene Bündel in Betracht kommt, kann man von einem Lichtverluste durch Reflexion sprechen; derselbe beträgt hier 4 Proz.

Folgerungen aus den Fresnelschen Formeln.

Das einfallende Bündel schwinge unter dem Winkel φ gegen E-E. Alsdann können wir die Lichtmenge 1 in die beiden Komponenten $\sin^2\varphi$ und $\cos^2\varphi$ zerlegen, von denen die erstere $\perp$, die zweite $\parallel E$-E schwingt. Mithin wird reflektiert bzw. gebrochen

$$\mathfrak{r}' = \mathfrak{r}_s \sin^2\varphi + \mathfrak{r}_p \cos^2\varphi\,;\ \mathfrak{d}' = 1 - \mathfrak{r}' \quad \ldots\ldots\ 5)$$

Das einfallende Bündel sei ein natürliches. Ein solches können wir in zwei gleich große Komponenten zerlegen, von denen die eine wieder $\perp$, die andere $\parallel E$-E schwingt. Es wird also reflektiert bzw. gebrochen

$$\mathfrak{r} = 0{,}5\,(\mathfrak{r}_s + \mathfrak{r}_p);\ \mathfrak{d} = 1 - \mathfrak{r} = 0{,}5\,(\mathfrak{d}_s + \mathfrak{d}_p) \quad \ldots\ 6)$$

Für $\alpha = 0$ wird wieder $\mathfrak{r} = (n-1)^2/(n+1)^2$.

Für $\alpha = \alpha'$ wird, da $\mathfrak{r}_p = 0$ ist, $\mathfrak{r} = 0{,}5\,(n^2-1)^2/(n^2+1)^2$; das reflektierte Bündel schwingt also $\perp$ E-E.

Beispiel 2. $n = 1{,}5$ gibt für $\alpha = 0$ und $56{,}3°$: $\mathfrak{r} = 0{,}040$ und $0{,}074$.

Polarisationszustand. Von der reflektierten Lichtmenge schwingt $\perp E$-E $0{,}5\,\mathfrak{r}_s$, $\parallel E$-E $0{,}5\,\mathfrak{r}_p$. Da $\mathfrak{r}_s \geqq \mathfrak{r}_p$ ist, können wir $0{,}5\,\mathfrak{r}_s$ in $0{,}5\,\mathfrak{r}_s - 0{,}5\,\mathfrak{r}_p$ und $\mathfrak{r}_p$ zerlegen. Der zweite Teil vereinigt sich mit dem $\parallel E$-E schwingenden $0{,}5\,\mathfrak{r}_p$ zu natürlichem Lichte. Mithin ist die $\perp E$-E schwingende Lichtmenge $0{,}5\,(\mathfrak{r}_s - \mathfrak{r}_p)$ und ihr Verhältnis zur gesamten reflektierten Lichtmenge $(\mathfrak{r}_s - \mathfrak{r}_p)/(\mathfrak{r}_s + \mathfrak{r}_p)$.

Im eindringenden Bündel schwingen $\parallel$ und $\perp E$-E $0{,}5\,\mathfrak{d}_p$ und $0{,}5\,\mathfrak{d}_s$; ihre Differenz $0{,}5\,(\mathfrak{d}_p - \mathfrak{d}_s) = 0{,}5\,(\mathfrak{r}_s - \mathfrak{r}_p)$ gibt den $\parallel E$-E schwingenden Anteil.

Die Theorie führt also unmittelbar zu dem Gesetze von Arago (S. 203), nach welchem die polarisierten Anteile im reflektierten und gebrochenen Bündel gleich sind und senkrecht zueinander schwingen.

Die durch die Gl. 1) bis 6) definierten Größen $\mathfrak{r}_s$ usw. haben wir auf S. 18 als *Oberflächen-Reflexionsvermögen* bezeichnet.

b) Lambertsches Absorptionsgesetz.

Fällt auf die Vorderfläche einer innerhalb eines absorbierenden Mittels (Körpers) liegenden Schicht die Lichtmenge G_0 auf, so tritt aus der Hinterfläche dieser Schicht die Lichtmenge aus

$$G = G_0 e^{-kl} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ 7)$$

wo k eine gewisse Konstante, l die Weglänge der Strahlen in dieser Schicht und e die Basis des natürlichen Logarithmensystems ist.

Nehmen wir statt der Schicht den ganzen Körper, so ist G_0 die eindringende, G die an der Hinterfläche ankommende Lichtmenge.

Beweis von Gl. 7). Unter der Annahme, daß G beim Durchlaufen einer unendlich dünnen Schicht des absorbierenden Mittels geschwächt wird um $dG = -kG\,dx$,

wo dx die Weglänge des Strahles ist, folgt $dx = -\frac{1}{k}\frac{dG}{G}$. Integriert man von $x = 0$, wo die einfallende Lichtmenge gleich G_0 ist, bis $x = l$, wo die Lichtmenge gleich G ist, so erhält man $l = \frac{1}{k} \log nat \frac{G_0}{G}$, woraus sich die Gl. 7) ergibt.

Das durch Gl. 7) ausgedrückte Gesetz wurde von Lambert für Gläser aufgestellt; es wird jedoch gewöhnlich nach Beer benannt, der zuerst seine Gültigkeit auch für durchsichtige Lösungen bewies.

Gl. 7) gilt nicht nur für schwach absorbierende Medien, sondern, wie Hagen und Rubens[1]) zeigten, auch für metallisch absorbierende Medien in sehr dünnen Schichten.

Gl. 7) läßt sich folgende Formen geben:

$$G = G_0 10^{-k'l}; \; G = G_0 e^{-4\pi k'' l/\lambda}; \; G = G_0 10^{-k_c''' c l}; \; G = G_0 a^l, \;. \;. \quad 8)$$

wo λ die Wellenlänge im absorbierenden Mittel bedeutet.

Die Größe k wird gewöhnlich Absorptionskoeffizient genannt.

Die Größe k' wird von Bunsen und Roscoe als Extinktionskoeffizient, von Hagen und Rubens als Absorptionskonstante bezeichnet; sie ist der reziproke Wert derjenigen Weglänge, welche erforderlich ist, um die eindringende Lichtmenge auf $^1/_{10}$ ihres ursprünglichen Betrages abzuschwächen.

Die Größe k'' wird in der Metalloptik nach dem Vorgange von Beer und Eisenlohr Extinktionskoeffizient genannt.

Die Größe k_c''' wird gewöhnlich als molekularer Extinktionskoeffizient für die Konzentration c bezeichnet, wobei c die Konzentration der Lösung (Anzahl Grammoleküle im Liter) bedeutet.

Die Größe a wird von Lambert, Beer und H. Krüss Absorptionskoeffizient, von Sabatier Transmissionskoeffizient, von H. A. Krüss Absorptionsfaktor genannt. Sie ist der Bruchteil, auf welchen die eindringende Lichtmenge geschwächt wird, wenn sie den Weg 1 in der Substanz zurücklegt. Im folgenden werde stets diese Größe angewandt.

Die Wahl der Längeneinheit für a hängt von der Natur des Körpers ab. Für reine atmosphärische Luft wird das Kilometer, für neblige Luft das Meter, für farblose Gläser und Flüssigkeiten das Centimeter, für stark absorbierende dunkle Gläser und farbige Lösungen das Millimeter genommen.

Experimentelle Bestimmungen von a für Glas, bezogen auf das Centimeter[2]). Der Wert a hängt von der Wellenlänge ab und variiert in dieser Abhängigkeit sowie seiner Größe noch stark von einer Glassorte zur anderen. Genauere Bestimmungen liegen nur wenige vor. Aus den Messungen von Christie an einem Flintglas berechnet Krüss a im Rot, Grün und Blau zu 0,945, 0,933 und 0,747; ein Crownglas ergab 0,915, 0,912 und 0,859. Für ein möglichst weißes Flintglas aus dem glastechnischen Laboratorium in Jena findet Krüss am roten Ende 0,969, in der Nähe der Fraunhoferschen Linie E 0,950 und am violetten Ende 0,860. Also selbst bei sogenanntem weißem Glase nimmt a mit der Brechbarkeit ab.

Das letztere beobachtete Vierordt auch bei einem scheinbar neutral gefärbten rauchgrauen Glase. Jedoch gibt es auch rauchgraue Gläser, welche die verschiedenen Wellenlängen nahezu gleich stark absorbieren. So untersuchte z. B. Krüss ein Glas, bei welchem sich mit geringen Schwankungen im Mittel $a = 0,670$ ergab.

---

[1]) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. **4**, 55 (1902); Ann. d. Phys. (4) **8**, 432 (1902).

[2]) Ausführlicheres s. G. und H. Krüss [Anm. 7, S. 259], S. 243—259.

Für weißes Licht berechnete Krüss aus dem vorliegenden Beobachtungsmateriale den Absorptionsindex von Crown-, Flint- und Leuchtturmglas — von einem herausfallenden Werte abgesehen — im Mittel zu 0,98. Durchschnittlich gibt Spiegelglas 0,96, rheinisches Tafelglas 0,86, gewöhnliches Fensterglas 0,80.

c) Auftreffen des Lichtes auf eine oder mehrere planparallele Platten.

Es werde zunächst von der Absorption abgesehen.

Eine Platte. Die im Medium I (Fig. 187) auf die Vorderfläche *ab* der Platte *abdc* (Medium II) auffallende Lichtmenge sei wieder 1; der Einfallswinkel sei wie in Fig. 2, S. 17 gleich α. Das Bündel möge $\perp E$-E schwingen. Alsdann wird reflektiert bzw. durchgelassen

$$R_{1,s} = \frac{2\,\mathfrak{r}_s}{1+\mathfrak{r}_s};\ D_{1,s} = \frac{1-\mathfrak{r}_s}{1+\mathfrak{r}_s} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9)$$

Für $\parallel E$-E schwingendes Licht wird

$$R_{1,p} = \frac{2\,\mathfrak{r}_p}{1+\mathfrak{r}_p};\ D_{1,p} = \frac{1-\mathfrak{r}_p}{1+\mathfrak{r}_p} \quad 9a)$$

Fig. 187.

Beweis von Gl. 9). Jeder Strahl wird an der oberen und unteren Grenzfläche in einen reflektierten und gebrochenen Strahl gespalten, und da $\mathfrak{r}_s$ und $\mathfrak{d}_s$ ungeändert bleiben, gleichviel ob die Reflexion an der oberen oder unteren Grenze geschieht, so ergeben sich die in Fig. 187 angedeuteten Lichtmengen, wobei der Einfachheit wegen der Index *s* fortgelassen ist. Mithin ist

$$R_{1,s} = \mathfrak{r}_s + \mathfrak{d}_s^2\,\mathfrak{r}_s + \mathfrak{d}_s^2\,\mathfrak{r}_s^3 + \cdots = \mathfrak{r}_s + \mathfrak{d}_s^2\,\mathfrak{r}_s\,(1 + \mathfrak{r}_s^2 + \cdots) = \mathfrak{r}_s + \frac{\mathfrak{d}_s^2\,\mathfrak{r}_s}{1-\mathfrak{r}_s^2}$$

$$= \mathfrak{r}_s + \frac{\mathfrak{r}_s\,(1-\mathfrak{r}_s)^2}{1-\mathfrak{r}_s^2} = \frac{2\,\mathfrak{r}_s}{1+\mathfrak{r}_s}.$$

$$D_{1,s} = \mathfrak{d}_s^2\,(1 + \mathfrak{r}_s^2 + \mathfrak{r}_s^4 + \cdots) = \frac{\mathfrak{d}_s^2}{1-\mathfrak{r}_s^2} = \frac{1-\mathfrak{r}_s}{1+\mathfrak{r}_s}.$$

Das auffallende Bündel sei ein natürliches. Dann ist

$$R_1 = 0{,}5\,(R_{1,s} + R_{1,p});\ D_1 = 0{,}5\,(D_{1,s} + D_{1,p}) \quad \ldots\ldots \quad 10)$$

Für $\alpha = 0$ ist nach Gl. 2) $R_1 = (n-1)^2/(n^2+1)$; $D_1 = 2\,n/(n^2+1)$.

Beispiel 3. Bei $\alpha = 0$ ist für

$n =$	1,5	1,6	1,7	1,8
$R_1 =$	0,077	0,101	0,126	0,151
$D_1 =$	0,923	0,899	0,874	0,849

Beispiel 4. $n = 1{,}5$ gibt für

$\alpha =$	0	15	30	45	60	75	90°
$R_1 =$	0,077	0,077	0,079	0,093	0,152	0,382	1,000
$D_1 =$	0,923	0,923	0,921	0,907	0,848	0,618	0,000

R_1 und D_1 sind also von $\alpha = 0$ bis $\alpha = 30°$ (steile Inzidenz) nahezu konstant; erst über $\alpha = 45°$ hinaus (bei verhältnismäßig schräger Inzidenz)

nimmt R_1 mit wachsendem α merklich zu, D_1 merklich ab. Dieses Ergebnis ist insofern wichtig, als man es meistens mit steiler Inzidenz zu tun hat.

k Platten. Das Bündel möge $\perp E$-E schwingen. Durch den sogenannten Schluß von k auf $k+1$ erhält man

$$R_{k,s} = \frac{2\,k\,\mathfrak{r}_s}{1+(2\,k-1)\,\mathfrak{r}_s}\,;\quad D_{k,s} = \frac{1-\mathfrak{r}_s}{1+(2\,k-1)\,\mathfrak{r}_s} \quad \ldots \quad 11)$$

Für ein $\parallel E$-E schwingendes Licht tritt der Index p an die Stelle von s.

Für natürliches Licht wird

$$R_k = 0{,}5\,(R_{k,s}+R_{k,p});\quad D_k = 0{,}5\,(D_{k,s}+D_{k,p}) \quad \ldots \quad 12)$$

Fällt das Licht unter dem P.-W. auf, so ist wegen Gl. 3) $R_{k,p}=0$, d. h.: das ganze reflektierte Bündel schwingt $\perp E$-E.

Beispiel 5. $n=1{,}5$ und $\alpha=0$ geben für $k=2$ bzw. 3 $R_k=14{,}3$ bzw. 20,0 Proz.

Die Zahlen, welche sich für $n=1{,}5$ ergeben, wenn das Bündel unter dem P.-W. ($\alpha=56{,}3^0$) auffällt, sind schon auf S. 203 mitgeteilt.

Es werde jetzt auch die Absorption berücksichtigt.

Eine Platte. Man erhält für ein $\perp E$-E schwingendes Bündel

$$\left.\begin{aligned} D_{1,s} &= \mathfrak{d}_s^2\,(\mathfrak{a}^l + \mathfrak{r}_s^2\,\mathfrak{a}^{3l} + \mathfrak{r}_s^4\,\mathfrak{a}^{5l} + \cdots) = \frac{\mathfrak{d}_s^2\,\mathfrak{a}^l}{1-\mathfrak{r}_s^2\,\mathfrak{a}^{2l}}\,;\\ R_{1,s} &= \mathfrak{r}_s + \frac{\mathfrak{d}_s^2\,\mathfrak{r}_s\,\mathfrak{a}^l}{1-\mathfrak{r}_s^2\,\mathfrak{a}^{2l}}\,. \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 13)$$

Für ein $\parallel E$-E schwingendes Bündel hat man wieder den Index p anstatt s zu setzen.

Meistens interessiert uns hier nur das durchgegangene Bündel, während das reflektierte als Verlust angesehen wird.

Mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit kann man Gl. 13) schreiben in der Form

$$D_{1,s} = \frac{1-\mathfrak{r}_s}{1+\mathfrak{r}_p}\,\mathfrak{a}^l \quad \ldots \ldots \quad 14)$$

d. h. $D_{1,s}$ setzt sich aus zwei Faktoren zusammen, welche die durchgegangenen Lichtmengen angeben, falls nur durch Reflexion bzw. nur durch Absorption ein Lichtverlust eintritt.

Für natürliches Licht ergibt sich wieder

$$R_1 = 0{,}5\,(R_{1,s}+R_{1,p});\quad D_1 = 0{,}5\,(D_{1,s}+D_{1,p}) \quad \ldots \quad 15)$$

Absorbiert wird also

$$A_1 = 1 - R_1 - D_1 \quad \ldots \ldots \quad 16)$$

Bei einem absorbierenden Körper nimmt D_1 schon von $\alpha=0$ an mit zunehmendem α ab; denn je schräger die Strahlen auffallen, um so größer ist die Weglänge l. (Vgl. Beispiel 4.)

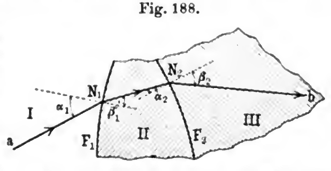
Mehrere Platten. Auch hier läßt sich R_k und D_k durch den Schluß von k auf $k+1$ berechnen; wir wollen jedoch hierauf nicht näher eingehen.

Folgerung. Gemäß den Definitionen auf S. 16 sind die durch die Gl. 9) bis 15) definierten Größen R und D das *regelmäßige Reflexions-* und *Durchlässigkeitsvermögen* des Systems von einer bzw. mehreren planparallelen Platten für die unter α auffallende Lichtmenge; ferner ist die durch Gl. 16) definierte Größe A_1 das *Absorptionsvermögen* der einen Platte für diese Strahlen.

d) Auftreffen des Lichtes auf einen beliebig gestalteten Körper.

Im Medium I soll die Lichtmenge 1 eines natürlichen Bündels in der Richtung $a N_1$ (Fig. 188) unter dem Einfallswinkel α_1 auf die Vorderfläche F_1 des Mittels II auftreffen, unter β_1 gebrochen werden, bei N_2 unter α_2 auf die Hinterfläche F_2 auftreffen und unter β_2 in Richtung $N_2 b$ ins Medium III gebrochen werden. Es möge bedeuten:

Fig. 188.



E-E_1 und E-E_2 die Einfallsebenen bei N_1 und N_2; φ den Winkel, welchen E-E_1 und E-E_2 bilden; $\mathfrak{d}_{1,s}$ und $\mathfrak{d}_{1,p}$ die mit $\mathfrak{d}_s$ und $\mathfrak{d}_p$ analogen Größen für die Fläche F_1; $\mathfrak{d}_{2,s}$ und $\mathfrak{d}_{2,p}$ die entsprechenden Größen für F_2.

Alsdann wird bei N_1 nach Gl. 6) gebrochen

$$D_1 = 0{,}5\,(\mathfrak{d}_{1,s} + \mathfrak{d}_{1,p}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 17)$$

Wir zerlegen nun $0{,}5\,\mathfrak{d}_{1,s}$ und $0{,}5\,\mathfrak{d}_{1,p}$ in je zwei Komponenten, von denen die eine $\perp$, die andere $\parallel$ E-E_2 schwingt, und erhalten, indem wir die gleichgerichteten Komp. addieren, als Komp. der bei N_2 auffallenden Lichtmenge, falls II nicht absorbiert,

$$G_s = 0{,}5\,(\mathfrak{d}_{1,s} \cos^2\varphi + \mathfrak{d}_{1,p} \sin^2\varphi); \quad G_p = 0{,}5\,(\mathfrak{d}_{1,p} \cos^2\varphi + \mathfrak{d}_{1,s} \sin^2\varphi) \quad . \; . \; 18)$$

Wenn II ein absorbierendes Mittel ist, und $N_1 N_2 = l$ gesetzt wird, sind nach Gl. 8) jene Komp.

$$G_s' = G_s\,\mathfrak{a}^l; \; G_p' = G_p\,\mathfrak{a}^l.$$

In diesem allgemeinen Falle wird bei N_2 ins Medium III gebrochen

$$D_2 = G_s\,\mathfrak{a}^l\,\mathfrak{d}_{2,s} + G_p\,\mathfrak{a}^l\,\mathfrak{d}_{2,p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 19)$$

D_2 werde als das *Durchlässigkeitsvermögen des Systems I, II, III für die in Betracht gezogenen (wirksamen) Strahlen* aN_1N_2b *bezeichnet*[1]). [Vgl. Nr. 7, S. 18.]

Wenn D_2 im Medium III auf eine dritte Fläche F_3 auffällt und ins Medium IV gebrochen wird, zerlegt man D_2 wieder in zwei Komp. $\perp$ und $\parallel$ E-E_3 und stellt entsprechende Formeln auf. In derselben Weise fährt man fort, wenn dieses gebrochene Bündel weiter an den Flächen $F_4 \ldots F_k$ gebrochen wird.

Wir hatten bisher den in der Praxis am meisten vorkommenden Fall (z. B. bei Linsen) betrachtet, daß die Strahlen nacheinander nur gebrochen werden. Die Rechnung wird in analoger Weise ausgeführt, wenn die Strahlen auch Reflexionen erfahren; geschieht dies z. B. für die Fläche F_m, so treten an Stelle von $\mathfrak{d}_{m,s}$ und $\mathfrak{d}_{m,p}$ die Größen $\mathfrak{r}_{m,s}$ und $\mathfrak{r}_{m,p}$.

Die Formeln vereinfachen sich wesentlich, wenn die Strahlen stets senkrecht oder doch nahezu senkrecht auf die regelmäßig reflektierenden und brechenden Flächen auffallen, und wenn die Einfallsebenen zusammenfallen.

Totalreflexion. Wenn die Strahlen an der Fläche F_m eine totale Reflexion erfahren, so sind $\mathfrak{r}_{m,s}$ und $\mathfrak{r}_{m,p}$ durch die Einheit oder derselben wenigstens sehr nahe Größen zu ersetzen; schwingt speziell das einfallende Licht $\perp$ oder $\parallel$ E-E_m, so schwingt das reflektierte ebenfalls $\perp$ oder $\parallel$ E-E_m.

Metallreflexion. Fallen die Strahlen auf eine vollkommen glatte Metallfläche F_m, so hat man statt $\mathfrak{r}_{m,s}$ und $\mathfrak{r}_{m,p}$ die Größen $R_{m,s}$ und $R_{m,p}$

[1]) Das Durchlässigkeitsvermögen des Systems III, II, I für die in genau entgegengesetzter Richtung $b N_2 N_1 a$ verlaufenden Strahlen ist ebenso groß wie D_2.

zu setzen, welche die nach den sog. metalloptischen Formeln zu berechnenden Reflexionsvermögen für ⊥ bzw. || E-E_m schwingenden Strahlen sind.

Wir wollen auch in dem allgemeineren Falle, daß sowohl Brechungen als auch Reflexionen erfolgen, dann wenn das Bündel an der letzten Fläche F_k gebrochen wird, die Größe D_k als das *Durchlässigkeitsvermögen des ganzen Systems für die wirksamen Strahlen* bezeichnen.

Beispiel 6. Auf eine Linse von der Dicke l falle in Richtung der Achse ein Bündel auf; alsdann ist das Mittel III mit I identisch, und es ergibt sich, da nach Gl. 2) $\mathfrak{d}_{1,s} = \mathfrak{d}_{1,p} = \mathfrak{d}_{2,s} = \mathfrak{d}_{2,p} = 4\,n/(n+1)^2$ ist,

$$D_2 = \frac{16\,n^2}{(n+1)^4}\,\mathfrak{a}^l.$$

Für $n = 1{,}5$; $l = 1{,}4$ cm; $\mathfrak{a} = 0{,}95$ wird

$$D_2 = 0{,}96^2 \times 0{,}95^{1,4} = 0{,}858.$$

Beispiel 7. Beim Lummer-Brodhunschen Gleichheitsphotometer ist, weil die wirksamen (ins Auge des Beobachters gelangenden) Strahlen nahezu senkrecht auf den Würfel fallen und nahezu senkrecht zu demselben austreten, das Durchlässigkeitsvermögen des Systems: Spiegel + Würfel für die von der linken bzw. rechten Seite des Photometerschirmes ik (Fig. 55 S. 175) kommenden Strahlen

$$D_k = R_f\,D_f \text{ bzw. } R_e\,D_e \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 20)$$

wo die R und D die auf S. 177 angegebene Bedeutung haben.

Wir haben bisher *einfarbiges Licht* vorausgesetzt. In Wirklichkeit hat man es jedoch meistens mit *weißem Lichte* zu tun. Im letzteren Falle müssen wir beim Gleichheitsphotometer die photometrischen Durchlässigkeits- und Reflexionsvermögen D_k, R_f, D_f, R_e, D_e (vgl. S. 19) in Betracht ziehen. Diese Größen weichen nicht wesentlich von den entsprechenden Werten für die physiologisch wirksamsten Strahlen (S. 65) ab (vgl. ferner Tabelle I Anhang; die Untersuchungen über $\mathfrak{a}$, S. 398; Beispiel 3, S. 399), und es ergibt sich für die photometrischen Größen

$$D_k = \mu\,R_f\,D_f \text{ bzw. } \mu\,R_e\,D_e \quad \ldots\ldots\ldots \quad 21)$$

wo μ eine gewisse von der spektralen Zusammensetzung der zu vergleichenden Lichtquellen abhängige Konstante ist.

Anhang 4.

Mittelbare Lichtstrahlung [1]).

a) Ableitung der Gesetzmäßigkeit für homogenes Licht.

1. Es sei F (Fig. 189) die vollkommen glatte Grenzfläche zweier nicht absorbierender Mittel I und II, N ein beliebiges, zunächst als punktförmig angenommenes Element von F, und S eine im Medium I liegende leuchtende Fläche. S soll *homogenes*, *natürliches* Licht aussenden, und zwar wollen wir statt der objektiven Lichtmenge gleich den ihr proportionalen physiologischen Lichtstrom ins Auge fassen. Das von S auf N fallende

[1]) Eine ausführliche Literaturzusammenstellung über diesen Gegenstand wird von Czapski in Winkelmanns Handbuch der Physik, 2. Aufl. 1906, Bd. 6, S. 242 gegeben. Vgl. außerdem Emtage, Phil. Mag. (5) 41, 504 (1896).

Bündel wird in ein reflektiertes und ein gebrochenes Bündel gespalten, von denen jedes innerhalb eines durch das Reflexions- und Brechungsgesetz bestimmten räumlichen Winkels verläuft. Demnach verhält sich N als das Element einer selbstleuchtenden oder diffus reflektierenden oder diffus durchlassenden Fläche, nur mit dem Unterschiede, daß es nicht nach allen Richtungen wie eine solche Fläche, sondern nur innerhalb der beiden räumlichen Winkel mit einer gewissen, sich im allgemeinen mit der Richtung ändernden Flächenhelle leuchtet. Es handelt sich also um die

Fig. 189.

Bestimmung der Flächenhelle des Elementes N. Es möge bezeichnen:

σ ein beliebiges Element der leuchtenden Fläche S,

s die Größe des Elementes N,

e die der Einfachheit wegen auf das Quadratmeter bezogene Flächenhelle von σ in Richtung σs,

e_1 bzw. e_2 die ebenfalls auf das Quadratmeter bezogene Flächenhelle von s in Richtung der reflektierten bzw. gebrochenen Strahlen,

n_1 bzw. n_2 den Brechungsexponenten von I bzw. II,

α und β den Einfalls- und Brechungswinkel der Strahlen σs,

ω bzw. ω' die Größe des räumlichen Winkels des einfallenden, also auch des reflektierten Strahlenbündels, bzw. des gebrochenen Strahlenbündels.

Alsdann ist der von σ nach s gesandte Lichtstrom analog der Gl. 6), S. 76

$$\Phi = e\,\omega\, s \cos\alpha \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

demnach der reflektierte bzw. gebrochene Lichtstrom

$$\Phi_1 = \mathfrak{r}\, e\,\omega s \cos\alpha \quad \text{bzw.} \quad \Phi_2 = (1-\mathfrak{r})\, e\,\omega s\cos\alpha \quad \ldots \quad 2)$$

wo

$$\mathfrak{r} = 0{,}5\,(\mathfrak{r}_s + \mathfrak{r}_p)$$

nach den **Fresnel**schen Formeln [Gl. 1), S. 396] zu bestimmen ist.

Andererseits kann man gemäß Gl. 5), S. 76, auch schreiben

$$\Phi_1 = e_1\,\omega s\cos\alpha;\ \Phi_2 = e_2\,\omega' s\cos\beta \quad \ldots\ldots \quad 3)$$

Durch Gleichsetzung der Ausdrücke in Gl. 2) und 3) ergibt sich unter Benutzung von Gl. 9), S. 395,

$$e_1 = \mathfrak{r}\, e;\quad e_2 = (1-\mathfrak{r})\, e\,\frac{\omega\cos\alpha}{\omega'\cos\beta} = \frac{n_2^2}{n_1^2}(1-\mathfrak{r})\, e \quad \ldots \quad 4)$$

Wir gelangen also zu folgendem Satze:

2. **Satz A.** Beleuchtet eine Fläche S (Fig. 190), nachdem ihre Strahlen an der Fläche F regelmäßig *reflektiert* sind, ein Flächenelement O, so läßt sich S durch die Fläche F und, gemäß dem Satze auf S. 93, ganz allgemein durch eine im ersten Medium willkürlich angenommene, beliebig gestaltete Fläche F' ersetzen, wenn man jedem Elemente $\mathfrak{N}$ von F' in Richtung $\mathfrak{N}O$ die Flächenhelle

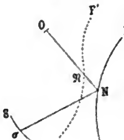
$$e_1 = \mathfrak{r}\, e \quad \ldots\ldots \quad 4a)$$

beilegt. Hierin ist e die Flächenhelle, welche das Element σ in Richtung σN besitzt, wenn σ dasjenige Element ist, in welchem der rückwärts verlaufende Strahl $O\mathfrak{N}N$ nach Reflexion an F die Lichtquelle S trifft.

Die Fläche F' wollen wir nach Analogie der Bezeichnung auf S. 93 die zu S *äquivalente Leuchtfläche* nennen.

Im Falle der regelmäßigen *Brechung* kann man die Fläche S durch eine beliebige, im zweiten Medium liegende äquivalente Leuchtfläche ersetzen, wenn man jedem Elemente $\mathfrak{N}$ derselben in Richtung $\mathfrak{N}O$ die Flächenhelle

Fig. 190.



$$e_2 = \frac{n_2^2}{n_1^2}(1 - \mathfrak{r})\,e \quad \ldots\ldots \quad 4b)$$

beilegt. Hierin ist e die Flächenhelle, welche dasjenige Element σ in Richtung σN besitzt, zu welchem man geführt wird, wenn man den Strahl $O\mathfrak{N}N$ gemäß dem Brechungsgesetze bis zur Lichtquelle verfolgt.

Führt in beiden Fällen der rückwärts verlaufende Strahl nicht auf die Lichtquelle, sondern in ihre Umgebung, so ist für das betreffende Element der äquivalenten Leuchtfläche e_1 bzw. e_2 gleich Null zu setzen.

Der Satz gilt auch, wenn die Strahlen an der Oberfläche von II *total* oder *metallisch* reflektiert werden; alsdann ist

$$e_1 = Re; \quad e_2 = 0 \quad \ldots\ldots \quad 5)$$

und zwar ist im ersteren Falle R entweder gleich 1 oder sehr nahezu 1; im letzteren Falle ist

$$R = 0{,}5\,(R_s + R_p) \quad \ldots\ldots \quad 6)$$

wo R_s und R_p die Reflexionsvermögen für senkrecht und parallel zur Einfallsebene schwingende Bündel sind.

Der Satz läßt sich auch auf beliebig viele reflektierende und brechende Flächen übertragen, wofern das erste und letzte Medium nicht absorbieren. Wir erhalten so

3. **Satz B.** Beleuchtet eine Fläche S ein Flächenelement O, nachdem ihre Strahlen im ganzen $k$mal an den Flächen F_1, F_2 ... F_k, sei es durch regelmäßige oder totale Reflexion an durchsichtigen Substanzen, oder durch Metallreflexion, oder durch regelmäßige Brechung, eine Änderung ihrer Richtung erfahren haben, so läßt sich S durch eine beliebige im letzten Medium angenommene äquivalente Leuchtfläche F ersetzen, wenn man jedem Elemente $\mathfrak{N}$ derselben in Richtung $\mathfrak{N}O$ die Flächenhelle beilegt

$$e' = \frac{n^2}{n_1^2}\,De \quad \ldots\ldots \quad 7)$$

Hierin ist

1. n_1 bzw. n der Brechungsexponent des ersten bzw. letzten Mediums.
2. e die Flächenhelle, welche dasjenige Element σ in Richtung σN_1 besitzt, in dem der gemäß der Reflexions- und Brechungsgesetze rückwärts verlängerte Strahl $O\mathfrak{N}N_k N_{k-1} \ldots N_1$ die Lichtquelle S trifft.
3. D der aus der letzten Fläche F_k bei N_k austretende Lichtstrom, wenn von σ auf F_1 in Richtung σN_1 der Lichtstrom 1 in Form eines parallelen natürlichen Elementarbündels auffällt und in Richtung $N_1 N_2 \ldots N_k O$ weitergeht; es ist also D das *Durchlässigkeitsvermögen* und $(1 - D)$ der *relative Lichtverlust* für die Strahlen $\sigma N_1 N_2 \ldots N_k O$ (und die in umgekehrter Richtung verlaufenden Strahlen).

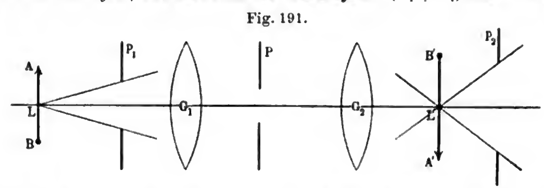
Die Größe D wird nach der auf S. 401 mittels der Gl. 17) bis 19) gegebenen Anleitung durch sukzessive Berechnung gefunden.

Das Element σ und die Richtung σN_1 wollen wir als dem Elemente O und der Richtung $O\mathfrak{R}$ gemäß dem Reflexions- und Brechungsgesetz *konjugiert* bezeichnen.

b) Anwendung des Satzes B auf ein optisches System zentrierter Flächen.

4. **Eintritts- und Austrittspupille.** G_1 und G_2 (Fig. 191) seien zwei Systeme zentrierter Kugelflächen, d. h. solcher Kugelflächen, deren Mittelpunkte alle in einer Geraden, der optischen Achse des Systems, liegen. ALB sei ein Objekt, welches durch das Gesamtsystem $(G_1 + G_2)$ in $A'L'B'$ ab-

Fig. 191.



errationsfrei, d. h. derart abgebildet wird, daß sich alle von einem Objektpunkte ausgehenden Strahlen nach dem Durchgang durch das System in einem Punkte, dem zugehörigen Bildpunkte, schneiden. Ferner seien $P, P' \ldots$ (in der Figur ist nur P angegeben) zwischen G_1 und G_2 liegende körperliche Blenden; $p_1, p_1' \ldots$ die Bilder von $P, P' \ldots$ in bezug auf G_1; $p_2, p_2' \ldots$ die Bilder von $P, P' \ldots$ in bezug auf G_2, also auch die Bilder von $p_1, p_1' \ldots$ in bezug auf $(G_1 + G_2)$. Von L aus gesehen, erscheine von den Bildern $p_1, p_1' \ldots$ das erstere unter dem kleinsten räumlichen Winkel. Alsdann kommen nur diejenigen von den Objektpunkten ausgehenden Strahlen, welche nach der Öffnung von p_1 zielen, bei der Bilderzeugung zur Geltung, und die von den Bildpunkten kommenden Strahlen durchsetzen die Öffnung von p_2 oder scheinen von ihr zu kommen. Die Öffnungen von p_1 und p_2 sind also für den Strahlengang als Begrenzung maßgebend.

Beim menschlichen Auge (S. 56) ist die Regenbogenhaut (Iris) mit der Pupillenöffnung eine solche Blende P. Von ihr entwerfen Hornhaut und Augenwasser ein Bild vor dem Auge. Demnach sind nur die nach diesem Bilde — der Pupille im physikalischen Sinne — zielenden Strahlen wirksam. Wegen dieser Analogie hat Abbe die wirksame Blende P eines Systems die *Iris*, das Bild p_1 der Iris im Objektraum die *Eintrittspupille* (E.-P.) und das Bild p_2 der Iris im Bildraum die *Austrittspupille* (A.-P.) genannt.

Beim Fernrohr und Mikroskop ist oft der Rand des Objektivs die Iris und zugleich die E.-P., und es ist dann das vom Okular entworfene Bild dieses Randes die A.-P. Man sieht die A.-P. als ein reelles oder virtuelles Bild, wenn man das Instrument in genügender Entfernung vom Auge gegen einen hellen Hintergrund hält.

5. **Das Bild als äquivalente Leuchtfläche.** Es sei C' ein Element des Bildes $A'B'$, C das zugehörige Element des Objektes AB, und O ein Element des Bildraumes (in Fig. 191 sind diese Größen nicht angegeben). Da ein Strahl OC', rückwärts verfolgt, durch C geht, so ergibt sich der Satz:

Jedes Bildelement C' leuchtet innerhalb eines durch die A.-P. begrenzten räumlichen Winkels, und zwar in der beliebigen Richtung $C'O$ mit der Flächenhelle

$$e' = \frac{n^2}{n_1^2} D e \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

wo e die Flächenhelle des zu C' gehörigen Objektelementes C in der zu $C'O$ konjugierten Richtung, und D das Durchlässigkeitsvermögen des Systems für die in der letzteren Richtung ausgehenden Strahlen ist.

Bei den meisten optischen Apparaten fallen Objekt- und Bildraum zusammen, d. h., es ist $n = n_1$; beim Immersionsmikroskop ist dagegen $n < n_1$. Da D ein echter Bruch ist, so kann die Flächenhelle des Bildes der des Objektes nicht einmal gleich gemacht werden; vielmehr ist sie stets infolge der Verluste durch Reflexion und Absorption beim Durchgange durch das System vermindert.

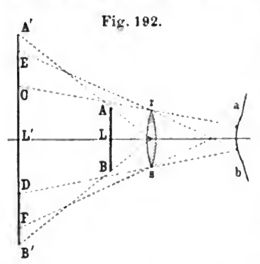
Leuchtet das Objektelement C innerhalb des durch die E.-P. begrenzten räumlichen Winkels, d. h. in allen wirksamen Richtungen, mit der konstanten Flächenhelle e, so leuchtet das Bildelement C' innerhalb des durch die A.-P. begrenzten räumlichen Winkels mit der konstanten Flächenhelle e', falls D, wie wir im folgenden stets annehmen wollen, für alle die entsprechenden Strahlenwege *konstant* ist.

Die Helligkeit h' eines Bildes bei subjektiver Beobachtung. Es werde angenommen, daß das Objekt AB *flächenhaft* ausgedehnt sei und in allen Elementen und nach allen wirksamen Richtungen mit der *gleichen* Flächenhelle leuchte. Die natürliche Helligkeit des ohne das System betrachteten Gegenstandes sei h [vgl. Gl. 7), S. 76]. Alsdann ist h' — von Verlusten durch Reflexion und Absorption abgesehen — gleich h, solange jeder Bildpunkt die ganze Pupille des Auges mit Strahlen erfüllt. Wenn die Strahlen die Pupille nur teilweise erfüllen, ist h' gleich hs'/s, wenn s' die Oberfläche des wirksamen Teiles der Pupille und s die Gesamtoberfläche der Pupille ist. Mit Berücksichtigung der Verluste ist

$$h' = Dh \text{ bzw. } Dhs'/s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9)$$

Helligkeit des Lupenbildes. In Fig. 192 sei rs die als Lupe dienende Sammellinse, AB der leuchtende Gegenstand, $A'B'$ sein virtuelles Bild, ab die auf der optischen Achse der Lupe befindliche Pupillenöffnung. Da der Linsenrand zugleich E.-P. und A.-P. ist, so ist die Wirkung auf das Auge so groß, als ob jedes Element von $A'B'$ mit der D-fachen Flächenhelle des Objektes durch den Rand der Linse als Öffnung einer natürlichen Blende leuchtet.

Fig. 192.



Es möge nun die Bildfläche von den Verlängerungen der Verbindungslinien ar, bs, br und as in den Punkten C, D, E und F geschnitten werden. Alsdann sieht das Auge den Kreis mit dem Radius $L'C = L'D$ an allen Stellen in der gleichen Helligkeit Dh, während in der ringförmigen Zone, die von den Kreisen mit den Radien $L'C$ und $L'E$ begrenzt wird, die Helligkeit stetig bis auf Null abnimmt; denn je näher die Punkte dem Rande zu liegen, einen um so kleineren Teil der Pupille erfüllen sie mit Strahlen, und Randpunkte senden nur noch unendlich wenige Strahlen ins Auge. (Die Anordnung ist bei photometrischen Apparaten, z. B S. 175 oben, immer so zu treffen, daß jedes Vergleichsfeld gleichförmig hell erscheint.)

Helligkeit des Bildes des astronomischen Fernrohres und des Mikroskops. Bei jenen Apparaten mit positivem Okular bringt man das Auge an den Ort der reellen A.-P., damit das Gesichtsfeld möglichst ausgenützt wird. Die A.-P. wird daher oft auch als *Okularkreis* bezeichnet. In diesem Falle sieht man das virtuelle Bild des durch das Objektiv

entworfenen reellen Bildes des Gegenstandes (wie bei der Lupe) durch die Öffnung des Okulars wie durch eine körperliche Blende, und zwar besteht das Gesichtsfeld hier nur aus einem gleichmäßig hellen Kreise, welcher dem Kreise mit dem Radius $L'C$ in Fig. 192 entspricht; denn die ringförmige Zone mit einer kontinuierlich bis auf Null abnehmenden Helligkeit ist durch eine am Orte des vom Objektiv entworfenen reellen Objektbildes angebrachte Blende abgeblendet. Die Helligkeit des Gesichtsfeldes ist wieder Dh, solange der Okularkreis größer als die Augenpupille ist, und gleich Dhs'/s, wenn er (s') kleiner als die Augenpupille (s) ist. Im letzteren Falle kann man, wenn man unmittelbar vor das Objektiv eine verstellbare Blende setzt, die Helligkeit des Bildes proportional der Blendenöffnung verändern. (Vgl. S. 200.)

6. **Die Austrittspupille als äquivalente Leuchtfläche.** Die Lichtwirkung auf ein beliebiges Element O des Bildraumes ist auch so groß, als ob jedes Element $\mathfrak{R}$ der A.-P. in Richtung $\mathfrak{R}O$ mit der D-fachen Flächenhelle leuchtet, welche das von dem Strahle $O\mathfrak{R}$ (bzw. $\mathfrak{R}O$) nach dem Durchgang durch das optische System getroffene Objektelement in der zu $O\mathfrak{R}$ konjugierten Richtung besitzt.

Liegt speziell O in der *Bildfläche*, so hat man jedem Elemente der A.-P. in einer beliebigen Richtung die D-fache Flächenhelle des O entsprechenden Objektelementes in der dazu konjugierten Richtung beizulegen. Wir können so bestimmen:

Die Beleuchtung des objektiv (auf einem Zerstreuungsschirme) aufgefangenen Bildes. Als Beispiel diene wieder eine gewöhnliche Sammellinse. Das kleine Objekt AB sei senkrecht zur optischen Achse derselben aufgestellt und leuchte wieder in allen Elementen nach allen wirksamen Richtungen mit der *gleichen* Flächenhelle e. Alsdann ist die Beleuchtung auf dem Projektionsschirme dieselbe, als wenn die vom Linsenrand eingeschlossene ebene Fläche F an allen Stellen mit der Flächenhelle De leuchtet. Ist die Bildweite d gegen die Öffnung der Linse und gegen die Dimensionen des Bildes $A'B'$ so groß, daß alle Strahlen nahezu senkrecht von F ausgehen und nahezu senkrecht auf $A'B'$ auffallen, so ist die Beleuchtung an allen Stellen des Schirmes nahezu die gleiche, und zwar nahezu[1]):

$$E = \frac{DFe}{d^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

Ist unmittelbar vor der Linse eine Blende von der Öffnung f angebracht, so tritt in Gl. 10) f anstatt F. Durch meßbares Ändern von f läßt sich also E ebenfalls meßbar ändern. (Vgl. die Gleichung auf S. 200).

7. **Beleuchtungslinse** (Linsenscheinwerfer). In der Brennebene der Sammellinse G (Fig. 193) befinde sich die leuchtende Fläche AB, welche wir zunächst als kreisförmige Scheibe annehmen wollen; ihr Mittelpunkt falle in den Brennpunkt F. Es möge bezeichnen:

ϱ den Radius des Linsenrandes; ϱ' den Radius von AB; f die Brennweite der Linse; α den sog. Leuchtwinkel AMB; φ den sog. Nutzwinkel N_1FN_2.

---

[1]) Die Beleuchtung der Bildebene in dem auf der Linsenachse liegenden Punkte ist — D für alle Stellen der Linse wieder als gleich angenommen — in aller Strenge

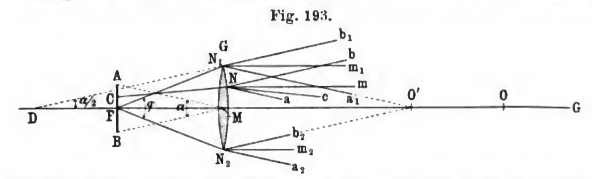
$$E = Den\sin^2\gamma,$$

wo γ der halbe Öffnungswinkel im Bilde, d. h. der Winkel ist, den der vom genannten Achsenpunkt nach dem Rande der Linse gezogene Strahl mit der Linsenachse bildet.

Wenn das Durchlässigkeitsvermögen für die direkten Strahlen sich mit dem Strahlenwege (etwas) ändert, ist die Größe D in Gleichung 10) das durchschnittliche Durchlässigkeitsvermögen.

Alle von F ausgehenden Strahlen treten parallel zur Linsenachse FMG aus der Linse aus, bilden mithin ein zylindrisches Strahlenbündel. Die von einem beliebigen Punkte C der Scheibe AB ausgehenden Strahlen CN treten in Richtung $Nc \parallel CM$ aus. Von jedem Linsenpunkte N geht demnach ein Strahlenkegel aus, dessen Achse $\parallel FM$ ist, und dessen Randstrahlen Na und $Nb \parallel AM$ und BM sind. $\measuredangle\, aNb = AMB = \alpha$ stellt die Abweichung von der zur Linsenachse parallelen Richtung, bedingt durch die räumliche Ausdehnung von AB, dar und heißt deshalb der Leuchtwinkel. Sämtliche

Fig. 193.



Strahlen verlaufen innerhalb eines durch den Rand der Linse begrenzten räumlichen Winkels, dessen Randstrahlen $N_1 b_1$ und $N_2 a_2 \parallel MB$ bzw. MA sind und sich im Punkte D der Linsenachse schneiden.

Mithin wird eine in der Entfernung r' von D senkrecht zu FG befindliche Ebene beleuchtet in einem Kreise, dem sog. Felde, vom Radius

$$a = r' \, tg \frac{\alpha}{2} = r' \frac{f}{\varrho'} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \; 11)$$

Lichtstärke der Linse in Richtung der Linsenachse. Der Linsenrand ist hier die A.-P., welche wieder als äquivalente Leuchtfläche angesehen werden möge. Wie aus Fig. 193 ersichtlich ist, wird das durch den Schnittpunkt von $N_1 a_1$ mit FG gehende Flächenelement O' von der ganzen Linse beleuchtet, und zwar leuchtet N_1 in Richtung $N_1 O'$ mit der D-fachen Flächenhelle, welche A in Richtung AN_1 besitzt; es ist also der ganze Kreis AB wirksam. Flächenelemente, welche auf der Linsenachse zwischen O' und M liegen, erhalten nur von einzelnen Teilen der Linse Licht. Flächenelemente O, welche auf der Linsenachse, von der Linse aus gesehen, hinter O' liegen, erhalten ebenfalls von der ganzen Linse Licht; dasselbe rührt von dem kreisförmigen Teile von AB mit dem Radius FE her, wo $EM \parallel N_1 O$ ist; diese zentrale Zone wird um so kleiner, je weiter das zu beleuchtende Flächenelement O von der Linse fortrückt.

Fig. 194.



Wir hatten bisher die Lichtquelle AB als eine kreisförmige angenommen. Unsere Betrachtungen gelten aber auch für *jede beliebige Gestalt* derselben, z. B. für die in Fig. 194 angegebene. Alsdann bringe man die Mitte der kreisförmigen Stelle $A'B'$ nach F, verbinde A' mit M und ziehe durch N_1 zu $A'M$ eine Parallele, welche die Linsenachse in O' schneidet. Es ist dies der der Linse zunächst liegende Punkt, welcher von der ganzen Linse beleuchtet wird.

Nimmt man an, daß die Scheibe in allen Elementen und nach allen wirksamen Richtungen mit der *gleichen* Flächenhelle e leuchtet, so erhält ein am Orte O senkrecht zur Linsenachse befindliches Flächenelement die Beleuchtung

$$E = \frac{DFe}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \; 12)$$

wenn F die vom Linsenrand eingeschlossene Fläche, und r der gegen ϱ hinlänglich große Abstand OM ist.

E ist also umgekehrt proportional r^2; mithin kann man, von der Stelle O' an gerechnet, von der Lichtstärke der Linse in Richtung der Linsenachse sprechen; dieselbe ist

$$J = DFe \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 13)$$

J ist der Fläche F und der Flächenhelle e des wirksamen Teiles der Lichtquelle direkt proportional, dagegen unabhängig von der Gestalt der Lichtquelle.

Man kann demnach J nicht durch Vergrößern der Lichtquelle, sondern nur dadurch vergrößern, daß man 1. die Öffnung der Linse vergrößert, 2. die Lichtquelle (z. B. eine Petroleumlampe) durch eine andere von höherer Flächenhelle (z. B. eine Acetylenlampe oder besser noch durch eine Bogenlampe) ersetzt.

Linsenfaktor. Das Verhältnis der Lichtstärke J der Linse zu der Lichtstärke J' der nackten Lampe wird vielfach der Linsenfaktor genannt. Diese Zahl sagt aber gar nichts aus, weil J unabhängig von der Größe der Lichtquelle, J' dagegen davon abhängig ist. Will man vergleichbare Zahlen haben, so müßte man stets einen gleich großen Teil der nackten Lichtquelle photometrieren, indem man eine Blende davorsetzt.

Mittlere Lichtstärke J_m der Linse. Der ganze von AB auf die Linse auffallende Lichtstrom ist, falls AB kreisförmig und ϱ' gegen f hinlänglich klein ist, gleich

$$\Phi = \varrho'^2 \pi^2 e \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 14)$$

Mithin ist nach Gl. 11) die mittlere Beleuchtung des Feldes in der Entfernung r' vom Punkte D

$$E = \frac{D\Phi}{r'^2 \pi \, tg^2 \frac{\alpha}{2}} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 15)$$

Die mittlere Lichtstärke der Linse innerhalb des räumlichen Winkels, in welchem die gesamten Strahlen verlaufen, ist also[1])

$$J_m = \frac{D\Phi}{\pi \, tg^2 \frac{\alpha}{2}} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 16)$$

wobei der Achsenpunkt D als Anfang der Zählung für r' genommen wird.

c) Verallgemeinerung des Satzes B für weißes Licht.

8. Es sei wieder das System der k Flächen gegeben, auf welches sich Satz B bezieht, und es möge die Fläche (Lichtquelle) S in weißem Lichte leuchten; ferner möge das letzte Medium mit dem ersten identisch sein. Alsdann ergibt sich folgendes.

Man sehe die Verbindungslinie des zu beleuchtenden Elementes O mit einem beliebigen Punkte $\mathfrak{N}$ der äquivalenten Leuchtfläche im letzten Medium als einen weißen Strahl an und verfolge ihn rückwärts durch das System hindurch. Der Strahl zerlegt sich an der ersten brechenden Fläche, zu der er gelangt, in seine verschiedenfarbigen Bestandteile, von denen jeder seinen Weg gemäß dem Brechungs- und Reflexionsgesetze fortsetzt.

---

[1]) Streng genommen ist $J_m = D\Phi/\omega$, wo ω die Größe des S. 408 genannten räumlichen Winkels ist; derselbe ist gleich $4\pi \sin^2(\alpha/4)$, wofür sich, wenn α sehr klein ist, $\pi \sin^2(\alpha/2) = \pi \, tg^2(\alpha/2)$ setzen läßt, so daß man ebenfalls Gl. 16) erhält.

Es sei nun $\mathfrak{N}$ so gelegen, daß die sämtlichen durch Brechung getrennten homogenen Strahlen die Lichtquelle in den Richtungen $N_1\sigma$, $N_1'\sigma'$... an den Stellen σ, σ'... treffen. Gehen umgekehrt von diesen Stellen die entsprechenden homogenen Strahlen in den Richtungen σN_1, $\sigma' N_1'$..., also in den zu $O\mathfrak{N}$ konjugierten Richtungen aus, so vereinigen sie sich sämtlich in der Richtung $\mathfrak{N}O$. Wenn die Lichtquelle an den in Betracht kommenden Stellen die gleiche Flächenhelle e besitzt, so leuchtet demnach das Element $\mathfrak{N}$ in Richtung $\mathfrak{N}O$ in weißem Lichte, und zwar — von Verlusten durch Reflexion und Absorption abgesehen — ebenfalls in der Flächenhelle e.

Gelangen die einfachen Strahlen, in welche sich der von O nach $\mathfrak{N}$ gehende weiße Strahl zerlegt, nur teilweise zur Lichtquelle, so leuchtet $\mathfrak{N}$ in Richtung $\mathfrak{N}O$, weil sich dann nur ein Teil der Farben deckt, in farbigem Lichte, und zwar ist die Flächenhelle von $\mathfrak{N}$ jetzt kleiner als e.

Mit Berücksichtigung der Lichtverluste ist allgemein die Flächenhelle des Elementes $\mathfrak{N}$ der äquivalenten Leuchtfläche in Richtung $\mathfrak{N}O$ gleich De, wo $(1-D)$ der relative Lichtverlust (S. 404) der von O in Richtung $O\mathfrak{N}$ ausgehenden und bis zur Lichtquelle gelangenden, ursprünglich weißen Strahlen ist. Für die Lichtwirkung bei optischen Apparaten ist nur derjenige Teil der äquivalenten Leuchtfläche maßgebend, der mit weißem Lichte strahlt.

Unsere Betrachtungen in Nr. 5 bis 7 bleiben auch für weißes Licht bestehen, wenn die durch Farbenzerlegung veranlaßten Fehler und die Aberrationsfehler praktisch so klein sind, daß man den einfachen Begriff des optischen Bildes festhalten kann.

In bezug auf die Beleuchtungslinse sei noch folgendes bemerkt: Die aus dem Brennpunkte kommenden Strahlen werden nur so lange der Linsenachse durch Brechung nahezu parallel gemacht, als der Durchmesser der Linse klein gegen die Brennweite ist, so lange also, als der Nutzwinkel φ klein ist. Alsdann ist aber die Lichtstärke der Linse in Richtung der Linsenachse verhältnismäßig klein. Vergrößert man den Durchmesser, so wird die Abweichung vom Parallelismus erheblicher, und es nimmt infolge der Dicke der Linse die Absorption in der Glasmasse, ferner die Farbenzerstreuung zu. Es erscheint dann ein mehr oder minder großer Teil am Rande der Linse gefärbt, so daß dieser Teil für die beabsichtigte Lichtwirkung verloren geht [1]).

Die Folgerungen, welche sich für das Lummer-Brodhunsche Gleichheitsphotometer ergeben, sind schon auf S. 178 besprochen; erwähnt möge hier nur werden, daß in diesem Falle von den beiden Schirmseiten ausgehendes weißes Licht nach Reflexion an den Spiegeln aus dem Photometerwürfel auch als weißes Licht austritt.

---

[1]) Die erwähnten Übelstände der Beleuchtungslinse sind bei dem bekannten Fresnelschen Beleuchtungsapparate zum Teil vermieden. Eine wesentliche Verbesserung erfuhr die Scheinwerferkonstruktion durch den Manginschen Spiegel, der aus einer hinten versilberten schwachen Konvex-Konkavlinse besteht. Alsdann treten die aus dem Brennpunkte kommenden Strahlen praktisch parallel zur Reflektorachse aus, solange der Durchmesser des Spiegels nicht größer als seine Brennweite ist. Aber selbst dann ist die Lichtstärke wegen des kleinen Nutzwinkels noch gering. Am vollkommensten wurde das Problem gelöst, als es 1886 Schuckert und Munker gelang, Glasparabolspiegel aus einem Stücke herzustellen.

Die Theorie des Parabolspiegels ist der der Beleuchtungslinse analog. Als äquivalente Leuchtfläche tritt hier die Öffnungsebene des Spiegels auf, und anstatt der Größe D ist das Reflexionsvermögen des Spiegels für die betreffende Richtung zu setzen.

Anhang 5.

Beglaubigung der Hefnerlampe.

(Vgl. S. 112, Zeile 4 ff.)

Prüfungsbestimmungen[1]. Die zweite (technische) Abteilung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt übernimmt die Prüfung und Beglaubigung von Hefnerlampen nach Maßgabe der folgenden Bestimmungen, welche auf Grund von Vereinbarungen mit dem Deutschen Verein von Gas- und Wasserfachmännern aufgestellt sind.

§ 1. Die Prüfung hat den Zweck, zu ermitteln, ob die Lichtstärke der Lampe, wenn dieselbe mit reinem Amylacetat gebrannt wird, bei der durch die Marke des zugehörigen Flammenmessers angezeigten Flammenhöhe und wenigstens 10 Minuten nach dem Anzünden dem durch die Normale der Reichsanstalt festgestellten Werte einer „Hefnerkerze"[2]) gleichkommt.

§ 2. Zur Prüfung zugelassen werden nur Hefnerlampen von der in der Anlage angegebenen Einrichtung, sofern ihnen einer der ebenda beschriebenen Flammenmesser und eine Kontrollehre beigegeben, und der Name des Verfertigers, sowie eine Geschäftsnummer auf der Lampe verzeichnet ist.

§ 3. Die Prüfung besteht:

1. in der Kontrolle der wichtigsten Abmessungen,
2. in der photometrischen Vergleichung mit den Normalen der Reichsanstalt unter Benutzung der der Lampe beigegebenen Flammenmesser.

§ 4. Ergibt die Prüfung, daß

1. die Wandstärke des Dochtrohres um nicht mehr als 0,02 mm im Mehr oder 0,01 mm im Minder, seine Länge um nicht mehr als 0,5 mm im Mehr oder Minder, sein innerer Durchmesser um nicht mehr als 0,1 mm im Mehr oder Minder von dem Sollwerte abweicht, ferner bei aufgesetzter Lehre der Abstand von dem oberen Dochtrohrrande bis zur Schneide der Lehre um nicht mehr als 0,1 mm von seinem Sollwerte abweicht,
2. die Lichtstärke von ihrem Sollwerte um nicht mehr als 0,02 desselben abweichend gefunden ist,

so findet die Beglaubigung statt.

§ 5. Die Beglaubigung geschieht, indem auf den folgenden Teilen der Lampe:

1. dem Gefäße, 2. dem die Dochtführung enthaltenden Kopfe, 3. dem Dochtrohre, 4. dem Flammenmesser, 5. der Lehre

die gleiche laufende Nummer nebst einem Kennzeichen der Prüfung angebracht wird. Als letzteres dient der Reichsadler. Außerdem wird über den Befund der Prüfung eine Bescheinigung ausgestellt, welche die Fehler in der Angabe der Lichtstärke abgerundet auf 0,01 ihres Sollwertes angibt.

§ 6. An Gebühren werden erhoben:

1. für die Prüfung und Beglaubigung einer Hefnerlampe mit einem Flammenmesser . . . . M. 3,00

---

[1]) Siehe Zentralbl. f. d. Deutsche Reich S. 124 (1893).

[2]) In der amtlichen Veröffentlichung heißt es noch „Hefnerlicht". (Vgl. S. 111.)

2. für die Prüfung und Beglaubigung einer Hefnerlampe mit Visier und optischem Flammenmesser . . . . . . M. 4,50
3. für die Prüfung und Beglaubigung einer Hefnerlampe mit einem Ersatzdochtrohre und einem Flammenmesser „ 4,50
4. für die Prüfung und Beglaubigung einer Hefnerlampe mit einem Ersatzdochtrohre und beiden Flammenmessern . . . . „ 5,50

Charlottenburg, den 30. März 1893.

Physikalisch-Technische Reichsanstalt.

v. Helmholtz.

Beschreibung der Hefnerlampe. Eine Hefnerlampe mit Visier nach von Hefner-Alteneck ist in Fig. 195 im Längsschnitt, in

Fig. 195.

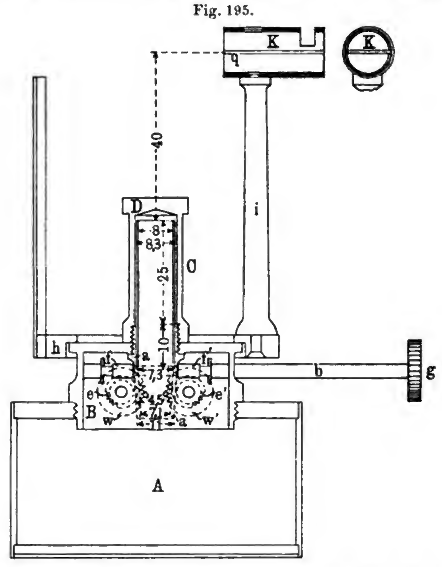


Fig. 196 von unten gesehen im Grundriß gezeichnet. Fig. 197 gibt einen Grundriß des Visiers, Fig. 198 eine Ansicht und Fig. 199 einen Grundriß des Flammenmessers nach Krüss. Ferner zeigen Fig. 200a, 200b und 200c die beizugebende Kontrollehre. Sämtliche Figuren sind in $^3/_4$ nat. Größe ausgeführt.

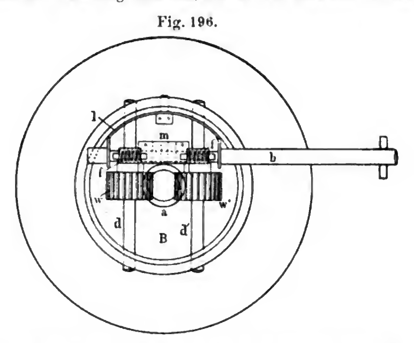
Die eigentliche Lampe besteht aus dem Gefäß *A*, dem die Dochtführung enthaltenden Kopf *B* und dem Dochtröhrchen *C*.

Das Gefäß *A* dient zur Aufnahme des Amylacetats; es ist aus Messing oder Rotguß hergestellt und im Innern verzinnt.

Der Kopf *B* trägt in seinem Innern erstens das dochtführende Rohrstück *a* (Fig. 195), welches an seinem unteren Teile zwei einander gegenüberliegende rechtwinkelige Ausschnitte enthält, und zweitens das Triebwerk.

Das letztere besteht aus zwei Achsen *d* und *d'* (Fig. 196), über welche zwei gezahnte, in die genannten rechtwinkeligen Ausschnitte eingreifende Walzen *w* und *w'* (Fig. 195 und 196) geschoben sind. Seitlich von den Walzen und mit diesen fest verbunden sitzen die Zahnräder *e* und *e'* (Fig. 195); diese können durch die beiden in sie eingreifenden, auf ein und derselben Achse *b* sitzenden

Fig. 196.



Schrauben ohne Ende *f* und *f'* in einander entgegengesetzter Richtung gedreht werden. Die Achse *b* endet in dem Knopfe *g*, mit dessen Hilfe das Triebwerk durch die Hand in Bewegung gesetzt wird. Um eine Verschiebung der Achse *b* in ihrer Längsrichtung zu verhindern, dient zunächst die in Fig. 196a besonders gezeichnete Feder *l* und außerdem eine auf der Achse *b* mitten zwischen den Schrauben *f* und *f'* befindliche ringförmige Verstärkung, welche in einer innen an der Decke des Kopfes *B* sitzenden Metallgabel *m* läuft. Das dochtführende Rohrstück *a* ragt über die obere Platte des Kopfes *B* um etwa 4 mm heraus und trägt an diesem herausragenden Ende außen ein Gewinde, mit welchem eine das Dochtrohr schützende Hülse *D* (Fig. 195) aufgeschraubt werden kann. Dicht neben dem Rohrstücke *a* befinden sich in der oberen Platte des Kopfes *B* zwei einander gegenüberliegende vertikale Öffnungen von etwa 1 mm Durchmesser, welche zur Zuführung der Luft an Stelle des verbrauchten Brennstoffes dienen. Dieselben liegen so, daß sie bei aufgeschraubter Hülse *D* von letzterer verdeckt werden.

Fig. 196 a.



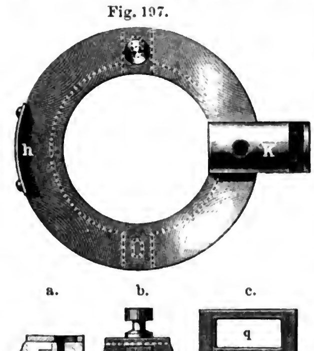
Das Dochtrohr ist aus Neusilber ohne Lötnaht hergestellt; seine Länge soll 35 mm, sein innerer Durchmesser 8 mm, seine Wandstärke 0,15 mm betragen. Es wird von oben in das Rohrstück *a* bis an einen an dem letzteren befindlichen vorstehenden Ansatz eingeschoben. Das herausragende Dochtrohrende soll dann 25 mm lang sein. Das Dochtrohr muß sich in seiner Hülse mit leichter Reibung bewegen lassen, so daß es leicht entfernt werden kann, ohne sich jedoch bei der Bewegung des Dochtes mit diesem hochzuschieben.

Der Flammenmesser, welcher zur Feststellung der richtigen Flammenhöhe (40 mm) dient, ist auf einem abnehmbaren, drehbaren und an jeder Stelle festklemmbaren Ring *h* (Fig. 195, 197, 198 und 199) befestigt, welcher auf die obere Platte des Kopfes *B* aufgesetzt wird. Die Einrichtung der Klemmvorrichtung ist aus Fig. 197a und 197b ersichtlich. Der Träger *i* (Fig. 195 und 198), welcher den Ring mit der eigentlichen Meßvorrichtung

verbindet, soll so fest sein, daß er ohne mechanische Hilfsmittel nur schwer verbogen werden kann.

Als Meßvorrichtung dient entweder ein Visier nach von Hefner-Alteneck oder eine optische Vorrichtung nach Krüss. Es können einer Lampe beide Flammenmesser beigegeben werden, jedoch dürfen dann nicht beide auf demselben Ringe befestigt sein.

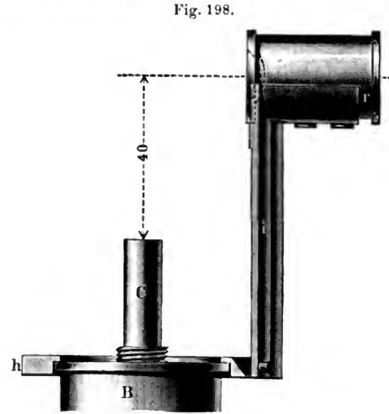
Fig. 197.



Das Visier *K* (Fig. 195 und 197) besteht aus zwei ineinander geschobenen Rohrstücken mit horizontaler, durch die Achse des Dochtröhrchens hindurch gehender Achse. Das innere Rohrstück ist der Länge nach durchschnitten und trägt ein horizontal liegendes blankes Stahlplättchen *q* (Fig. 195 und 197 c) von 0,2 mm Dicke mit einem rechtwinkeligen Ausschnitt. Die untere Ebene des Stahlplättchens soll 40 mm über dem oberen Rande des Dochtrohres liegen.

Die optische Vorrichtung *r* (Fig. 198 und 199) besteht aus einem etwa 30 mm langen Rohrstück, dessen Achse ebenfalls horizontal liegt und durch die Achse des Dochtrohres hindurchgeht. Das Rohrstück ist auf der dem Dochtrohre zugewandten Seite durch ein kleines Objektiv von etwa 15 mm Brennweite geschlossen,

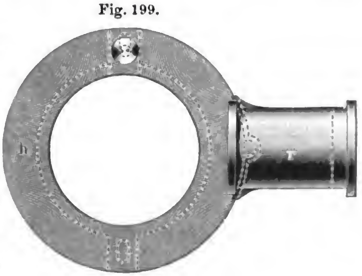
Fig. 198.



auf der entgegengesetzten Seite durch eine matte Scheibe, welche von feinem Korn sein und dem Objektiv ihre matte Seite zuwenden soll. Die letztere trägt in ihrer Mitte eine horizontale schwarze Marke von nicht

mehr als 0,2 mm Dicke. Das durch das Objektiv entworfene Bild der oberen Kante dieser Marke soll genau 40 mm über der Mitte des oberen Dochtrohrrandes liegen.

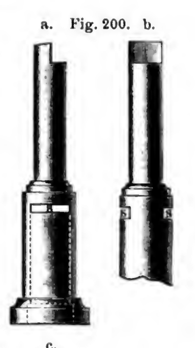
Fig. 199.



Kein Teil des Flammenmessers darf abschraubbar oder drehbar sein. Soweit dabei Befestigungsschrauben zur Verwendung kommen, sollen ihre Köpfe um die Schnittiefe abgefeilt sein.

Die Lehre dient zur Kontrolle der richtigen Stellung des oberen Randes des Dochtrohres sowie derjenigen des Flammenmessers. Ihre Einrichtung ist aus den Fig. 200a, b und c ersichtlich. Wenn sie über das Dochtrohr geschoben ist, so daß sie auf der Decke des Kopfes *B* fest aufsteht, so soll beim Hindurchblicken durch den in etwa halber Höhe der Lehre befindlichen Schlitz *s* (Fig. 200a und b) zwischen dem oberen Rande des Dochtrohres und der horizontalen Decke des inneren Hohlraumes der Lehre eine feine, weniger als 0,1 mm breite Lichtlinie sichtbar sein; außerdem muß die Schneide oben an der Lehre bei Benutzung des Visiers in der Ebene der unteren Fläche des Stahlplättchens liegen. Bei Benutzung des optischen Flammenmessers muß die Schneide der Lehre in der oberen Kante der Marke des Flammenmessers scharf abgebildet werden. Der Abstand zwischen dem oberen Dochtrohrrande und der Schneide der Lehre muß somit genau 40 mm betragen.

a. Fig. 200. b.



c.



Der obere Teil der Lehre hat einen Durchmesser von etwas weniger als 8 mm. Er muß sich leicht in das Dochtrohr hineinschieben lassen und dient zur Herausnahme des letzteren, falls dessen Reinigung nötig ist.

Die Lehre ist aus Messing und zwar aus einem Stück herzustellen.

Sämtliche Metallteile der Lampe außer dem Dochtrohr und dem Stahlplättchen des Visiers sind mattschwarz zu beizen.

Beglaubigungsschein [1])

für die Hefnerlampe Nr.

Zu der Lampe gehören [2]): *ein Visier nach von Hefner-Alteneck, ein optischer Flammenmesser nach Krüss, ein Ersatzdochtrohr* und eine Lehre,

---

[1]) Neuere Fassung. Die Rückseite des Scheines enthält eine Notiz über die Einführung der Bezeichnung Hefnerkerze sowie Literaturangaben.

[2]) Die kursiv gedruckten Stellen ändern sich bei jedem einzelnen Prüfungsschein je nach Erfordernis.

Die Abweichungen von den vorgeschriebenen Abmessungen liegen bei den Dochtrohren und der Lehre innerhalb der für die Beglaubigung vorgeschriebenen Grenzen.

Die Lichtstärke betrug bei der photometrischen Prüfung ***mit beiden Flammenmessern und mit beiden Dochtrohren***

1,00 Hefnerkerze.

Da hiernach die Lampe den Beglaubigungsvorschriften entspricht, wurde sie mit der oben angegebenen amtlichen Nummer, dem Reichsadler und der Jahreszahl vorschriftsmäßig gestempelt.

Außerdem trägt die Lampe den Fabrikstempel: Nr. ......

Charlottenburg, den ......

Physikalisch-Technische Reichsanstalt Abteilung II.
(Unterschrift).

Gebrauchsanweisung. *Der Docht.* Die Beschaffenheit des Dochtes ist im allgemeinen auf die Lichtstärke nicht von Einfluß. Es ist nur darauf zu achten, daß er das Dochtrohr einerseits völlig ausfüllt, andererseits nicht zu fest in dasselbe eingepreßt ist. Man benutzt daher am einfachsten eine genügende Anzahl zusammengelegter dicker Baumwollfäden. Da derartige lose Dochte aber von nicht sorgfältig gearbeiteten Triebwerken bisweilen mangelhaft verschoben werden, außerdem im Innern des Gefäßes leicht Schlingen bilden und sich dann in den Zahnrädern und Walzen des Triebwerkes festsetzen, so sind häufig umsponnene Dochte in Gebrauch genommen worden. Gegen die Benutzung derselben ist nichts einzuwenden, solange sie die oben angegebene Bedingung einhalten, das Dochtrohr voll auszufüllen, ohne darin allzusehr eingepreßt zu sein.

Das Amylacetat. Bei der Beschaffung des Amylacetats für die Hefnerlampe muß mit Vorsicht zu Werke gegangen werden, da das im Handel befindliche Material häufig Beimischungen enthält, welche es für photometrische Zwecke unbrauchbar machen. Es ist daher notwendig, das Amylacetat aus einer zuverlässigen Handlung zu beziehen und bei dem Ankauf anzugeben, daß es für photometrische Zwecke benutzt werden soll.

Um den Bezug brauchbaren Amylacetats zu erleichtern, hat es der Deutsche Verein von Gas- und Wasserfachmännern übernommen, geeignetes Amylacetat in genügender Menge zu beschaffen, es auf seine Brauchbarkeit zu untersuchen, und durch seine Geschäftsstelle (Geheimer Hofrat Dr. Bunte in Karlsruhe) in plombierten Flaschen (von 1 Liter Inhalt an) abzugeben.

Will man von dieser Gelegenheit, geprüftes Amylacetat zu beziehen, keinen Gebrauch machen, so ist anzuraten, den anderweitig bezogenen Brennstoff zunächst auf seine Brauchbarkeit zu untersuchen. Am besten bedient man sich dazu der folgenden, größtenteils von Herrn Dr. Bannow angegebenen Proben. Amylacetat ist danach für Lichtmessungen verwendbar, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Das spezifische Gewicht muß 0,872 bis 0,876 bei 15° betragen.
2. Bei der Destillation (im Glaskolben) müssen zwischen 137° und 143° wenigstens $^{9}/_{10}$ der Menge des Amylacetats übergehen.
3. Das Amylacetat darf blaues Lackmuspapier nicht stark rot färben.
4. Wird zu dem Amylacetat ein gleiches Volumen Benzin oder Schwefelkohlenstoff gegeben, so sollen sich beide Stoffe ohne Trübung mischen.
5. Schüttelt man in einem graduierten Zylinder 1 ccm Amylacetat mit 10 ccm Alkohol von 90 Proz. (Tralles) und 10 ccm Wasser, so soll eine klare Lösung erfolgen.

6. Ein Tropfen Amylacetat soll auf weißem Filtrierpapier verdunsten, ohne einen bleibenden Fettfleck zu hinterlassen.

Das Amylacetat ist gut verkorkt am besten im Dunkeln aufzubewahren.

Behandlung der Lampe. Vor der Messung. Nachdem die Lampe mit Amylacetat gefüllt und der Docht eingezogen ist, wartet man, bis der letztere vollständig durchfeuchtet ist. Man überzeugt sich, daß das Triebwerk den Docht gut auf- und niederbewegt, ohne das Dochtrohr mitzuverschieben. Sodann wird der Docht ein wenig aus dem Rohre herausgeschraubt und das den Rand des Dochtrohres überragende Stück mit einer scharfen Schere möglichst glatt abgeschnitten. Hierauf untersucht man mit Hilfe der beigegebenen Lehre die richtige Stellung des oberen Dochtrohrrandes, sowie des Flammenmessers, wobei die folgenden Bedingungen erfüllt sein müssen:

Wenn man die Lehre über das Dochtrohr geschoben hat, so daß sie auf dem das Triebwerk tragenden Kopfe fest aufsteht, und wenn man dann durch den in ungefähr halber Höhe befindlichen Schlitz gegen einen gleichmäßig hellen Hintergrund (Himmel, beleuchtetes weißes Papier) hindurch sieht, so soll zwischen dem oberen Rande des Dochtrohres und der Decke des inneren Hohlraumes der Lehre eine feine, weniger als 0,1 mm breite Lichtlinie sichtbar sein. Die Schneide der Lehre muß bei Benutzung des Visiers in der Ebene der unteren Fläche des Stahlplättchens liegen; bei Benutzung des optischen Flammenmessers muß die Schneide der Lehre in der oberen Kante der Marke des Flammenmessers scharf abgebildet werden.

Die neben dem Dochtrohre befindlichen Löcher dürfen nicht verstopft sein.

Mit der Messung soll frühestens 10 Minuten nach dem Anzünden begonnen werden. Die Temperatur des Beobachtungsraumes soll zwischen 15° und 20° liegen.

Während der Messung. Die Lampe soll sich während der Messung auf einem horizontalen Tischchen an einem erschütterungsfreien Platze und in reiner zugfreier Luft befinden. Verunreinigung der Luft namentlich durch Kohlensäure (durch Brennen von offenen Flammen, Atmen mehrerer Personen) verringert die Lichtstärke der Hefnerlampe erheblich[1]). Der Photometerraum muß daher vor jeder Messung sorgfältig gelüftet werden. In sehr kleinen Räumen, z. B. ringsum geschlossenen photometrischen Apparaten, darf die Hefnerlampe nicht benutzt werden. Zugluft beeinträchtigt in hohem Grade das ruhige Brennen der Flamme und macht ein hinreichend genaues Einstellen der richtigen Flammenhöhe unmöglich.

Als Lichtmaß dient die Lichtstärke der Hefnerlampe in horizontaler Richtung bei einer Flammenhöhe von 40 mm vom oberen Rande des Dochtrohres aus gemessen — Hefnerkerze[2]). — Die Flammenhöhe wird mit Hilfe der beigegebenen Flammenmesser eingestellt, und zwar gilt bei Benutzung des Hefnerschen Visiers folgende von Herrn von Hefner-Alteneck gegebene Vorschrift:

Der helle Kern der Lampe soll, wenn man durch die Flamme hindurch nach dem Visier blickt, von unten scheinbar an das Visier anspielen. Das schwach leuchtende Ende der Flammenspitze fällt dann nahezu mit der Dicke des Visiers zusammen; erst bei scharfem Zusehen erscheint noch ein Schimmer von

---

[1]) Vgl. S. 120 dieses Buches.

[2]) Siehe S. 119 dieses Buches.

Licht bis ungefähr 0,5 mm über dem Visiere. Die von der Flamme beschienenen Kanten des Visiers sind stets blank zu halten.

Bei dem Krüssschen Flammenmesser wird der äußere Saum der Flamme durch die matte Scheibe absorbiert; demgemäß hat man bei Benutzung desselben die Flammenhöhe so zu regulieren, daß die äußerste sichtbare Spitze des Flammenbildes die Marke auf der matten Scheibe berührt. Dabei hat der Beobachter auf die matte Scheibe in möglichst senkrechter Richtung zu blicken.

Die Einstellung der richtigen Flammenhöhe muß mit großer Sorgfalt ausgeführt werden. Man beachte, daß hier ein Fehler von 1 mm eine Abweichung von etwa 3 Proz. in der Lichtstärke hervorbringt.

Es ist darauf zu achten, daß die von der Flamme beschienenen Teile der Lampe (außer dem Dochtrohr), insbesondere der Flammenmesser, gut matt geschwärzt sind. Scheint dies nicht in genügendem Maße der Fall zu sein, so tut man gut, zwischen der Flamme und dem Photometerschirme nahe der Lampe einen mit einem Ausschnitt versehenen schwarzen Schirm anzubringen, der die Reflexe abblendet. Man hat indessen dabei Sorge zu tragen, daß nicht gleichzeitig Teile der Flamme abgeblendet werden.

Nach der Messung. Während des Brennens bildet sich am Rande des Dochtrohres ein brauner, dickflüssiger Rückstand. Derselbe ist möglichst oft, jedenfalls stets nach Benutzung der Lampe, solange dieselbe noch heiß ist, durch Abwischen zu entfernen. Soll die Lampe für längere Zeit nicht wieder benutzt werden, so ist das Amylacetat sowie der Docht daraus zu entfernen und die Lampe gründlich zu säubern. Ist es dabei nötig, das Dochtrohr herauszunehmen, so soll dies unter Zuhilfenahme des oberen Teiles der Lehre geschehen.

Zu dieser *amtlichen Veröffentlichung* sei in bezug auf die Ausführung der Messungen noch folgendes *hinzugefügt*.

Am besten stellt man den Flammenmesser so auf, daß seine Achse, nämlich die Achse des Rohres K in Fig. 195 bzw. die Achse des Rohres r in Fig. 198, auf der Bankachse senkrecht steht.

Selbst in ruhiger Luft entstehen durch das Atmen und die Bewegung der Beobachter sowie durch die Verschiebung des Photometers, auch wenn man geeignete Schirme aufstellt, Luftströmungen, welche bewirken, daß die Flamme außer den unvermeidlichen auf- und abgehenden Bewegungen noch hin- und hergehende Bewegungen um die vertikale Stellung ausführt.

Nun vermag der am Flammenmesser befindliche Beobachter diejenigen seitlichen Schwankungen, welche senkrecht zur Achse des Flammenmessers, also in Richtung der Bankachse erfolgen, am stärksten wahrzunehmen; der hierdurch veranlaßte Fehler kann also leicht vermieden werden. Dagegen vermag er geringe Schwankungen in Richtung der Achse des Flammenmessers nicht zu sehen; er wird deshalb öfter das Signal auch bei schiefer Stellung der Flamme, also bei einer zu langen Flamme, geben, wodurch man einen zu hohen Lichtstärkenwert erhält.

Diese Unsicherheit wird herabgemindert, wenn sich der am Photometer befindliche Beobachter nicht mit der auf das erste Signal gemachten Einstellung begnügt, sondern noch ein zweites Signal und nötigenfalls zur Kontrolle noch ein drittes abwartet. Ist beim zweiten Signal das von der Hefnerlampe beleuchtete Feld deutlich heller als beim ersten, so hat man beim zweiten Signal die Einstellung zu unterlassen, weil die Flamme jetzt vermutlich schief steht. Erscheint beim zweiten Signal dieses Vergleichsfeld jedoch deutlich dunkler, so hat man aus dem eben genannten Grunde die erste Einstellung zu verwerfen und eine neue zu machen, welche einen kleineren Abstand zwischen Hefnerlampe und Photometerschirm liefert.

Zur Erzielung einer noch größeren Genauigkeit empfiehlt es sich, daß der am Flammenmesser befindliche Beobachter fortwährend über die Stellung der Flamme Auskunft gibt. Bei größeren Abweichungen in der Höhe und bei Schwankungen in Richtung der Bankachse braucht man dann nicht ins Photometer zu sehen, kann also sein Auge ausruhen. Bei kleineren Abweichungen in der Höhe gewinnt man eine gewisse Kontrolle für die Richtigkeit der zuletzt gemachten Einstellung, wenn man sich überzeugt, ob das photometrische Gesichtsfeld den Angaben des Flammenbeobachters entspricht. Zeigt sich bei einer zu großen bzw. zu kleinen Flammenhöhe das betreffende Vergleichsfeld zu hell bzw. zu dunkel, so ist die Einstellung anscheinend richtig. Ist bei einer zu kleinen Höhe das Feld zu hell, so kann man hieraus nicht auf die Unrichtigkeit der Einstellung, vielmehr auf Schiefstehen der Flamme schließen. Wenn dagegen bei einer zu hohen Flamme das Feld zu dunkel ist, so ist die zuletzt gemachte Einstellung, weil hierbei die Flamme offenbar schief stand, zu verwerfen, und es ist so lange zu warten, bis man beim Signal das Photometer der Flamme näher einstellen muß.

Um einen zuverlässigen Mittelwert zu erhalten, hat man mindestens 10 Einstellungen hintereinander zu machen; dieselben dürfen, wie nochmals betont werden muß, nur auf das Signal hin ausgeführt werden.

Wenn man nach dem erwähnten Prinzip verfährt, wird man auch bei nicht ganz ruhiger Luft brauchbare Messungen machen. Immerhin ist hierzu einige Übung erforderlich; insbesondere ist es notwendig, daß man mit einer einzigen Verschiebung richtig einzustellen vermag. (Vgl. S. 423.)

Anhang 6.

Bestimmung hoher Temperaturen mittels Strahlungsmessungen.

Unter Temperatur werde im folgenden immer die absolute (S. 43) verstanden.

Das Quecksilberthermometer ist nur bis zu Temperaturen von höchstens 850° verwendbar. Mit dem Stickstoffthermometer[1]) kann man bis zu 1870° und mit dem Thermoelement aus Iridiumruthenium-Iridium vielleicht bis zu etwa 2300° kommen. Für noch höhere Temperaturen ist man bisher ausschließlich auf Strahlungsmessungen angewiesen. Dieses Verfahren, das sich schon für Temperaturen von etwa 1000° mit Vorteil anwenden läßt, besitzt den großen Vorzug, daß die Messungen aus der Ferne vorgenommen werden können, so daß eine Beschädigung des Meßinstrumentes durch direkte Berührung mit dem zu messenden Körper, sowie eine Änderung der Temperatur des letzteren durch das Meßinstrument ausgeschlossen ist.

Zur Grundlage der Strahlungsmessungen kann jedes der Grundgesetze I bis V (S. 44 bis 46) benutzt werden. Da diese nur für *schwarze Körper* gelten, so kann mittels derselben auch nur die Temperatur schwarzer Körper,

[1]) Holborn und Valentiner, Berl. Ber. **44**, 811 (1906); Ann. d. Phys. (4) **22**, 1 (1907).

und mit diesen wollen wir uns zunächst beschäftigen, genau gemessen werden.

Energetische Messungen. Man bestimmt mittels Bolometers oder Thermosäule die Wellenlänge λ_{max} (S. 43) und findet aus Gl. II die Temperatur zu $0{,}294/\lambda_{max}$ (Methode 1).

Oder man bestimmt das maximale Emissionsvermögen H_{max} (S. 43) oder das Gesamtemissionsvermögen H (S. 43) in absolutem Maße und erhält $\theta = k\sqrt[5]{H_{max}}$ aus Gl. III (Methode 2), bzw. $\theta = k'\sqrt[4]{H}$ aus Gl. I (Methode 3), wo k und k' aus den Werten für C_2 und C (S. 45 unten) leicht abzuleitende Konstanten sind. Man kann auch mit relativen Messungen auskommen, wenn man einen schwarzen Körper von der bekannten Temperatur θ_1 heranzieht und nur die reduzierten Galvanometerausschläge (vgl. S. 46 unten) berücksichtigt. Beträgt der Ausschlag für die unbekannte Temperatur S_{max} bzw. S, für die bekannte Temperatur $S_{1,max}$ bzw. S_1, so ist $\theta = \theta_1\sqrt[5]{S_{max}/S_{1,max}}$ bzw. $\theta = \theta_1\sqrt[4]{S/S_1}$.

Von den drei Methoden ist 1 am ungenauesten, da λ_{max} weniger genau als H_{max} und H zu bestimmen ist, und ein Fehler in λ_{max} mit seinem ganzen Betrage, dagegen ein Fehler in H_{max} und H nur mit $1/5$ bzw. $1/4$ des Betrages (vgl. Beisp. 11, S. 390) in die Temperaturbestimmung eingeht. Die beiden spektralen Methoden 1 und 2 kommen wegen ihrer Umständlichkeit nur für Laboratoriumsversuche in Betracht; dagegen wird Methode 3, z. B. in der Anordnung von Féry, in der Technik verwendet.

Für *nichtschwarze Körper*, welche wir von jetzt an ebenfalls berücksichtigen wollen, erhält man nach Methode 1 eine obere Temperaturgrenze; für Körper, deren Strahlungseigenschaften zwischen denen des schwarzen Körpers und des blanken Platins liegen, gewinnen Lummer und Pringsheim[1]) als untere Grenze aus Gl. IIa (S. 47) $0{,}263/\lambda_{max}$. Sie fanden so für eine starkfadige Glühlampe bei 12,87 Ampere und 16,3 Volt aus $\lambda_{max} = 0{,}000\,14$ cm 2100^0 und 1880^0 als Grenzen (S. 336).

Photometrische Messungen. Die Methode gründet sich darauf, daß für homogenes Licht das Verhältnis der Emissionsvermögen zweier Flächen gleich dem Verhältnisse ihrer Flächenhellen ist (vgl. S. 19 und 68).

Aus Gesetz V, welches für das ganze sichtbare Gebiet bis zu den höchsten Temperaturen gültig ist, folgt $\log H_\lambda = K - \frac{c}{\lambda\mathfrak{M}}\frac{1}{\theta}$, wo $K = \log C_2 - 5\log\lambda$, also konstant, und $\mathfrak{M} = \log nat\ 10$ der Modul der nat. Logarithmen ist[2]). Zieht man eine konstante Vergleichslampe heran und bestimmt mittels irgend eines Spektralphotometers bei der Wellenlänge λ die Flächenhelle e des zu messenden Körpers, bezogen auf diejenige der Vergleichslampe (bzw. des von der Vergleichslampe beleuchteten Kollimatorspaltes), so wird $\log e = K_1 - \frac{c}{\lambda\mathfrak{M}}\frac{1}{\theta}$. Die Instrumentalkonstante K_1 wird mittels des schwarzen Körpers von der bekannten Temperatur θ_1 bestimmt. Ergibt sich dessen Flächenhelle zu e_1, so wird

$$\log\frac{e}{e_1} = \frac{c}{\lambda\mathfrak{M}}\left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta}\right) \qquad 1)$$

[1]) Phys. Z. 3, 97 (1901/02); Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 3, 36 (1901).

[2]) Während der Drucklegung ist durch Holborn und Valentiner (Anm. 1, S. 419) die Konstante c zu 1,42 (statt 1,46, wie auf S. 45 angegeben) bestimmt worden.

Nach dieser Methode findet man für die Temperatur nichtschwarzer Körper einen zu niedrigen Wert. Diesen Wert nennt man die **schwarze Temperatur**; es ist dies also nicht die Temperatur des anvisierten „nichtschwarzen" Körpers, sondern eines „schwarzen Körpers", der für die bestimmte Wellenlänge λ die gleiche Flächenhelle besitzt wie der zu untersuchende. Für die erwähnte Kohlenfadenlampe fanden Lummer und Pringsheim bei 12,87 Ampere spektralphotometrisch 2040°, so daß die Temperatur in die relativ engen Grenzen 2100° und 2040° eingeschlossen ist.

Vorzüge der spektralphotometrischen Methode sind: 1. An die Genauigkeit der Messungen brauchen nur geringe Anforderungen gestellt zu werden, weil die Flächenhelle sehr schnell mit der Temperatur wächst (vgl. S. 55 oben). 2. Ein Mangel in der Schwärze des Körpers übt keinen großen Einfluß aus, da nach Lummer und Pringsheim bei gleicher Flächenhelle der Temperaturunterschied sogar zwischen dem schwarzen Körper und dem blanken Platin bei 1100° nicht 50° und bei 1880° nicht 130° übersteigt.

Auf dem photometrischen Prinzip [1]) beruht das

Pyrometer von Wanner [2]). Dasselbe ist ein etwas modifiziertes Königsches Spektralphotometer (Fig. 113, S. 259). Als Vergleichslampe dient eine kleine 6-Voltlampe, welche die mattierte Kathetenfläche des vor die eine Spalthälfte gesetzten Reflexionsprismas beleuchtet. Die zu messende Strahlung tritt durch die andere Spalthälfte ein. Gemessen wird bei der Wellenlänge 0,656 μ der roten Wasserstofflinie. Man stellt mittels des Okularnicols N auf gleiche Helligkeit ein, liest den von der Dunkelstellung für das Vergleichslicht an gezählten Drehungswinkel φ ab und entnimmt die gesuchte Temperatur θ einer Tabelle. Diese ist nach Gl. 1) berechnet, in welcher e/e_1 durch $tg^2\,\varphi/tg^2\,\varphi_1$ ersetzt ist, wenn φ_1 der zur Eichtemperatur θ_1 des schwarzen Körpers gehörende Drehungswinkel ist.

Zu starke Strahlungen (über etwa 1800°) muß man auf meßbare Weise, z. B. durch Rauchgläser, rotierende Sektoren, abschwächen. Es sei D das Schwächungsverhältnis. Man findet dann θ aus einer zweiten Tabelle, welche aus Gleichung 1) berechnet ist, in welcher e/e_1 durch $tg^2\,\varphi/D\,tg^2\,\varphi_1$ ersetzt ist.

Zur Kontrolle der Konstanz der Glühlampe dient eine Hefnerlampe, welche ein vor den Spalt gesetztes Mattglas bei konstanter Flammenhöhe aus konstanter Entfernung beleuchtet. Es wird dann das Okularnicol in die für die Kontrolle vorgeschriebene Stellung gebracht und durch Ändern des Glühlampenstroms eine photometrische Einstellung ausgeführt.

Infolge des großen Lichtverlustes durch Polarisation ist der Apparat nur für Temperaturen über 1200° zu verwenden.

Pyrometer von Holborn und Kurlbaum [3]). Von der zu untersuchenden glühenden Fläche erzeugt das Objektiv eines Fernrohres ein Bild, welches mit dem Kohlenbügel einer 4-Voltlampe zusammenfällt. Bild und Kohlenbügel werden mit dem Okular betrachtet, vor das ein rotes Glas geschaltet ist, und der Lampenstrom wird so einreguliert, daß die Spitze des Kohlenbügels auf dem Bilde der Fläche verschwindet. Am gleichzeitig ein-

---

[1]) Die photometrische Methode wurde zuerst von Becquerel [Ann. Chim. Phys. (3) **68**, 49 (1863)], später vielfach von Le Chatelier [C. R. **114**, 214 und 470 (1892)] unter Benutzung einer empirisch aufgestellten Beziehung zwischen Temperatur und Flächenhelle angewandt. Auch Crova [Ann. Chim. Phys. (5) **19**, 472 (1880)] führte optische Messungen aus, indem er die Temperatur aus dem Verhältnis der Flächenhellen zweier Wellenlängen bestimmte.

[2]) Ann. d. Phys. (4) **2**, 141 (1900).

[3]) Berl. Ber. **30**, 712 (1901); Ann d. Phys. (4) **10**, 225 (1903).

geschalteten Amperemeter wird direkt die Temperatur abgelesen, da das Amperemeter mittels eines schwarzen Körpers von bekannter Temperatur geeicht ist.

Zu starke Strahlungen werden wieder meßbar abgeschwächt, gewöhnlich mittels Prismen. Ist θ die am Amperemeter abgelesene, scheinbare Temperatur, so findet man die wahre Temperatur x aus

$$\frac{1}{x} = \frac{\lambda \mathfrak{M}}{c} \log D + \frac{1}{\theta}.$$

Außer in Rot werden auch noch Messungen in grünem und blauem Lichte ausgeführt; man spricht dann von der schwarzen Temperatur im roten, grünen und blauen Lichte.

Das Pyrometer ist für Temperaturen von 900° an verwendbar.

Anhang 7.

Übungsaufgaben.

Die Empfehlung bestimmter photometrischer Apparate ist sehr schwierig, da bei der *Auswahl* außer dem Zwecke auch noch die verfügbaren Räumlichkeiten und Geldmittel usw. eine Rolle spielen.

Für die gewöhnlichen Zwecke der Praxis, nämlich für die Bestimmung von horizontalen und mittleren horizontalen Lichtstärken, wird vielfach ein *Photometeraufsatz* (z. B. von Bunsen, Lummer-Brodhun, Martens) in Verbindung mit einer geraden, eine Kerzenteilung tragenden *Photometerbank* bevorzugt. (Vgl. z. B. S. 311 ff., 382.) Meistens ist die Bank 2,5 oder 3 m lang. Eine solche ist aber für Lichtquellen von größeren Abmessungen, also für Lampen mit großen Glocken und Reflektoren, nicht anwendbar, weil hier das Entfernungsgesetz (S. 31 oben, S. 75 und 89) nicht mehr gilt. Alsdann muß man entweder eine weit längere Bank benutzen, oder man muß die Lichtquellen außerhalb der Bank von gewöhnlicher Länge in geeigneter Entfernung aufstellen. Im letzteren Falle ist allerdings die Kerzenteilung nicht mehr zu gebrauchen; allein man kann diesem Übelstande durch Entwerfen einer Tabelle abhelfen. Lichtquellen von größerer Lichtstärke (über 80 HK) kann man nicht ohne weiteres auf einer kurzen Bank mit der Hefnerlampe vergleichen. Denn 1. wird die Entfernung zwischen dieser Lampe und dem Photometerschirm so klein (vgl. Tab. VII, S. 432), daß das Entfernungsgesetz nicht mehr gültig ist und ein geringer Fehler in der Zentrierung der Lampe (S. 310) einen großen Ablesungsfehler veranlaßt (vgl. S. 386); 2. wird die Beleuchtung auf dem Photometerschirm so groß, daß die Genauigkeit der photometrischen Einstellung beeinträchtigt wird (S. 155). Den ersteren Fehler kann man dadurch vermeiden, daß man die Hefnerlampe durch eine entsprechend stärkere Zwischenlichtquelle ersetzt. Hierdurch wird aber der zweite Fehler noch vergrößert. Derselbe läßt sich jedoch beseitigen oder doch stark vermindern, und zwar am besten mittels rotierender Sektoren, andernfalls mittels Rauchgläser, Polarisatoren, Zerstreuungslinsen, sogenannte dioptrische Zerstreuer [1]). Am günstigsten ist es, auch bei Starklichtquellen mit großen Entfernungen zu arbeiten.

[1]) Vgl. Krüss, Die Starklichtphotometrie, J. f. G. u. W. **49**, 109 (1906). In dieser Arbeit bezeichnet Krüss 10 bis 20 Lux als die zum Photometrieren günstigste Beleuchtung des Photometerschirmes, und über 30 Lux als bereits schädliche Beleuchtung. Die Reichsanstalt benutzt gewöhnlich 2 bis 6 Lux.

Über die Prüfung von elektrischen Glühlampen auf mittlere Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse s. S. 330 bis 332 und S. 378 bis 381.

Auch zur Bestimmung der räumlichen Lichtverteilung kann man mit einer geraden Photometerbank in Verbindung mit einem Photometeraufsatz auskommen. Für Lampen von geringeren Abmessungen, also von nackten oder mit kleinen Glocken versehenen Bogenlampen, Gasglühlichtapparaten, elektrischen Glühlampen usw., lassen sich dann die auf S. 288 bis 295 beschriebenen Hilfsapparate mit drehbaren Spiegeln[1]), für elektrische Glühlampen außerdem noch besondere Stative (S. 296) benutzen. Für Lampen von größeren Dimensionen sind diese Spiegel nicht zu empfehlen, weil auch sie zu große Dimensionen haben müssen und daraus Schwierigkeiten entstehen (S. 288). Solche Lampen beanspruchen höhere Beobachtungsräume, als man gewöhnlich benutzt, und zwar hat man einen Aufzug (S. 324 und 325) anzubringen, mittels dessen die Lampen nach Bedarf gehoben oder gesenkt werden können. Zu messen ist hierbei nach der Hartleyschen Methode (S. 285 ff.). Da jedoch das Abblenden fremden Lichtes hier sehr schwierig ist, benutzt man statt der geraden Photometerbank und eines Photometeraufsatzes besser die Photometer von Weber, Mascart, Blondel-Broca, das Polarisationsphotometer von Martens, das Straßenphotometer von Brodhun (Modell 1), welche ein drehbares Beobachtungsrohr besitzen. (Vgl. S. 285.)

Für die Bestimmung der mittleren räumlichen Lichtstärke dürfte vor allem das Ulbrichtsche Kugelphotometer in Betracht kommen.

Zur Bestimmung der Beleuchtung kann außer den früher angeführten Photometern auch noch das Brodhunsche Straßenphotometer dienen. Zu diesem Zwecke ersetzt Brodhun den Tubus B in Fig. 93a, S. 224 durch einen ähnlichen Tubus B'' mit einem rechtwinkeligen Reflexionsprisma[2]), welches die Strahlen der anvisierten hinreichend weit entfernten, zu messenden Fläche S nach dem Photometerkörper P reflektiert.

Die vorher erwähnten Photometer mit drehbarem Beobachtungsrohr haben den Vorzug, daß sie *tragbar* sind und nicht allein Lichtstärken, sondern auch Beleuchtungen und — mit Ausnahme des Mascartschen Photometers — Flächenhellen zu messen gestatten. Wenn möglich, verwende man auch bei diesen Photometern als Vergleichslampe eine nur mäßig beanspruchte elektrische Glühlampe. (Vgl. S. 152 ff.)

Bei Benutzung eines jeden Photometers wolle man die beiden folgenden Punkte beachten:

1. Man suche möglichst mit einem Schlage (vgl. S. 419) eine photometrische Einstellung zu machen; das oft, zumal von Anfängern, geübte Verfahren, in immer kleiner werdenden Abständen um die photometrische Gleichgewichtslage vielfach hin und her zu pendeln, ermüdet bei längeren Versuchsreihen das Auge unnötig.
2. Das Auge muß gut ausgeruht sein und vor fremdem Lichte geschützt werden.

Wir wollen nun einige der häufigsten *Aufgaben* besprechen.

a) Es werde eine gerade mit einer Millimeterteilung versehene Photometerbank in Verbindung mit einem Lummer-Brodhunschen Photometer P zugrunde gelegt.

Aufstellung der Formeln. Es seien wie in Fig. 55, S. 175 L_2 und L_1 die beiden zu vergleichenden Lampen. Sind r_2 und r_1 die sich bei der

[1]) Solche Spiegel besitzt auch das Brodhunsche Straßenphotometer, Modell 2, S. 227, das sich deshalb ebenfalls zu solchen Messungen eignet.

[2]) Nötigenfalls schaltet man zwischen Reflexionsprisma und Photometerkörper P eine Linse so ein, daß ihr Abstand von S (gemessen längs des Strahlenganges) gleich ihrer Brennweite ist. Alsdann wird S mittels dieser Linse und der Okularlinse C' genau am Orte der Okularblende D abgebildet.

photometrischen Einstellung in einer Lage, z. B. A (S. 177), ergebenden Abstände L_2P und L_1P, r_2' und r_1' die entsprechenden Abstände in Lage B, so ist, wenn

$$0{,}5\,(r_2 + r_2') = [r_2];\quad 0{,}5\,(r_1 + r_1') = [r_1]$$

gesetzt wird, nach Gl. 2), S. 177 und Gl. 6), S. 178

$$J_2 = \frac{[r_2]^2}{[r_1]^2} J_1;\quad J_2 = c\,\frac{r_2^2}{r_1^2} J_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)\ 1\,a)$$

Versuchsanordnung 1 wie auf S. 390, also $r_2 + r_1 = r_2' + r_1' = const = l$.

Aufgabe 1. Der Gasglühlichtapparat L_2 ist bei gegebenem Konsum (oder die elektrische Glühlampe L_2 bei gegebener Spannung usw.) auf Lichtstärke in vorgeschriebener Ausstrahlungsrichtung durch direkten Vergleich mit der Hefnerlampe L_1 zu untersuchen.

Hierbei sei L_2 auf den Teilstrich 100, L_1 auf den Teilstrich 2400 der Photometerbank aufgestellt. Die Lichtstärke der Hefnerlampe berechne sich unter Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit, wie im Beispiel auf S. 119, zu $J_1 = 1{,}023$ HK. Die Indizes der Wagen für L_2 und L_1 seien nach den Angaben auf S. 311, Anm. 1, angebracht. In Lage A werde P auf den Teilstrich 1820,8, in Lage B auf 1816,2 eingestellt.

Es ergibt sich in Millimeter $r_2 = 1720{,}8$; $r_1 = 579{,}2$; $r_2' = 1716{,}2$; $r_1' = 583{,}8$, so daß $[r_2] = 1718{,}5$; $[r_1] = 581{,}5$; am einfachsten findet man jedoch $[r_2]$ und $[r_1]$ durch das Mittel aus den Einstellungen des Photometers, nämlich 1818,5. Mithin ist $J_2 = \frac{1718{,}5^2}{581{,}5^2}\,1{,}023 = 8{,}93$ HK [1]).

Aufgabe 2. Eine der Type 3a (S. 328) angehörige Kohlenfadenlampe L_2, welche als Normallampe dienen soll, ist bei gegebener Lichtstärke J_2 in der Ausstrahlungsrichtung II (S. 329 u. f.) auf die zugehörige Spannung zu untersuchen.

Man stellt P in der Entfernung $r_2 = lp/(1 + p)$, wo $p = \sqrt{J_2/c\,J_1}$ ist, auf und macht in Stellung A durch Änderung der Spannung eine photometrische Einstellung.

Beweis. Obiger Wert r_2 ergibt sich aus Gl. 1a), in der $r_1 = l - r_2$ gesetzt ist.

Beispiel. Es sei $J_2 = 16$ HK; $J_1 = 5$ HK, $l = 2300$ mm und, wie auf S. 179, $c = 0{,}994$. Alsdann ist $p = 1{,}7942$, $r_2 = 1476{,}9$ mm.

Aufgabe 3. L_2 ist unter Benutzung einer Vorrichtung [2]), welche die Lampe um ihre Achse zu drehen gestattet (vgl. Fig. 94b auf S. 228, ferner S. 269 und 324), auf mittlere Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse $J_{2,m}$ zu prüfen.

1. Man bestimmt die Lichtstärken in einer größeren Anzahl q gleich weit voneinander entfernter Ausstrahlungsrichtungen und nimmt aus den q Werten das Mittel (vgl. Tabelle 1 auf S. 331, wo q von 3 bis 20 geht). Dieses Verfahren verlangt q Berechnungen. Einfacher verfährt man in folgender Weise.

2. Wenn in jeder Ausstrahlungsrichtung je eine Einstellung in Lage A und B gemacht ist, nehme man aus den $2q$ Einstellungen des Photometers

---

[1]) Es empfiehlt sich, in jeder der beiden Lagen des Photometers zur Erhöhung der Genauigkeit statt einer Einstellung mindestens fünf (S. 419) zu machen und gleich aus allen Werten das Mittel zu nehmen. Hierbei genügt es im allgemeinen, die Stellung des Photometers jedesmal auf ganze Millimeter abzulesen und erst den Mittelwert in Zehntelmillimeter anzugeben. (Vgl. ferner Aufgabe 3 auf S. 392.)

[2]) Auf die Anwendung des rotierenden Spiegelapparates für elektrische Glühlampen werde erst S. 426 eingegangen.

das Mittel, bestimme den Abstand $r_{2,m}$ für die Mittelstellung des Photometers und berechne J_2 nach Analogie von Gl. 1) aus $J_{2,m} = J_1 r_{2,m}^2/(l - r_{2,m})^2$.

3. Wenn in jeder Ausstrahlungsrichtung nur in Lage A gemessen ist, nehme man aus den q Einstellungen des Photometers das Mittel und berechne J_2 analog Gl. 1a).

4. Falls q eine gerade Zahl ist, messe man in den aufeinander folgenden Richtungen abwechselnd in Lage A und B und berechne $J_{2,m}$ aus der mittleren Einstellung des Photometers analog Gl. 1).

Die bei diesem abgekürzten Verfahren begangenen Fehler liegen bei hinlänglich großem q (mindestens 10) selbst dann, wenn die Einzelwerte der Lichtstärken beträchtlichere Abweichungen (bis zu etwa 40 Proz.) zeigen, innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler.

Aufgabe 4. Eine der Type 3a angehörige Kohlenfadenlampe L_2 ist bei gegebener mittlerer Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse $J_{2,m}$ auf Spannung $\mathfrak{v}$ zu untersuchen.

1. Man bestimmt die Spannung $\mathfrak{v}_2$, bei der L_2 in Richtung II die Lichtstärke $J_{2,m}$ besitzt; man bestimmt bei dieser Spannung die mittlere Lichtstärke a und sucht diejenige Spannung, bei der die Lichtstärke in Richtung II $J_2' = J_{2,m}^2/a$ ist. Dies ist die gesuchte Spannung $\mathfrak{v}$.

Denn es verhält sich $a : J_{2,m} = J_{2,m} : J_2'$.

Meistens genügt es zu messen bei $J_2' = 2\,J_{2,m} - a$.

Beispiel. Es sei $J_{2,m} = 16$ HK; es ergebe sich $a = 15{,}24$ HK. Dann ist zu messen bei $J_2' = 16{,}80$ HK; die Näherungsformel ergibt 16,76 HK.

Dieses Verfahren verlangt im ganzen drei Messungen. Man kann für technische Zwecke aber auch mit den folgenden zwei Messungen auskommen.

2. Man bestimmt wie vorher die Spannung $\mathfrak{v}_2$; sie sei $= 110{,}8$ Volt. Nun ist nach S. 331 für Type 3a die Lichtstärke in Richtung II durchschnittlich um 6 Proz. größer als die mittlere; ferner entspricht bei normal beanspruchten Kohlenfadenlampen 1 Proz. Spannungsänderung etwa 5,6 Proz. Lichtstärkenänderung (vgl. Beispiel 9, S. 388). Mithin muß die Spannung $\mathfrak{v}_2' = \mathfrak{v}_2 + 6/5{,}6$ Proz. $= 112{,}0$ Volt nahezu die gesuchte sein. Die Messung bei $\mathfrak{v}_2'$ ergebe 16,08 HK, also einen um 0,5 Proz. zu großen Wert, so daß man $\mathfrak{v}_2'$ um $0{,}5/5{,}6 = 0{,}09$ Proz. zu erniedrigen hat. Mithin ist $\mathfrak{v} = 111{,}9$ Volt.

Aufgabe 5[1]. Gegeben ist bei vorgeschriebener Spannung die Lichtstärke J_2 in Richtung α; gesucht wird die mittlere Lichtstärke $J_{2,m}$.

Man photometriert in Lage A Lichtquelle L_2 mittels irgend einer konstanten Lichtquelle L_1 in Richtung α; die Einstellung sei r_2. Sodann photometriert man ebenfalls in Lage A in den übrigen $(q-1)$ Richtungen; die mittlere Einstellung für die q Richtungen sei $r_{2,m}$. Alsdann ist der Umrechnungsfaktor

$$\frac{J_{2,m}}{J_2} = \frac{r_{2,m}^2}{(l - r_{2,m})^2}\,\frac{(l - r_2)^2}{r_2^2}.$$

Ist umgekehrt $J_{2,m}$ gegeben und J_2 gesucht, so ist der Umrechnungsfaktor der reziproke Wert.

Versuchsanordnung 2 wie auf S. 391. Dann ist $r_1 = const$; mithin gehen Gl. 1) und 1a), wenn man die Konstante

$$J_1/r_1^2 = E$$

setzt, über in

$$J_2 = [r_2^2]\,E; \quad J_2 = c\,r_2^2\,E \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)\;2a)$$

---

[1]) Solche Aufgabe ergibt sich für den Praktiker in dem Falle, daß ihm von irgend einem anderen Laboratorium, z. B. von der Reichsanstalt, J_2 bestimmt ist.

E wird, wie bereits auf S. 232 an einem Beispiele gezeigt wurde, mittels der Hefnerlampe (oder einer Normallampe) L_n, die man an Stelle von L_2 setzt, aus deren Lichtstärke J_n bestimmt als

$$E = J_n/[r_n]^2.$$

Gl. 2a) (Lage A) läßt sich auch schreiben in der Form

$$J_2 = r_2^2 E', \text{ wo } E' = cE.$$

E' wird entweder indirekt aus c (vgl. S. 179) und E, oder direkt mittels L_n bestimmt als

$$E' = J_n/r_n^2.$$

Aufgabe 6. Die elektrische Glühlampe L_2 soll bei gegebenem $J_{2,m}$ unter Benutzung des rotierenden Spiegelapparates von Brodhun gemessen werden. Die Rotationsachse liege in der Verlängerung der Bankachse über den Nullpunkt der Teilung hinaus; der Abstand des Lampenbildes vom Nullpunkte sei d.

Ist r_2 der Abstand des Lampenbildes von P, ist ferner C der reziproke Wert der Summe der Reflexionsvermögen der beiden Spiegel (S. 332), so ist $J_{2,m} = r_2^2 CE'$, so daß $r_2 = \sqrt{J_{2,m}/CE'}$.

Beispiel. Es sei $J_{2,m} = 25$ IK; $C = 0{,}5435$; $E' = 1{,}711$ Lux; $d = 4000$ mm; alsdann ist $r_2 = 5{,}185$ m; mithin hat man P auf den Teilstrich 1185 der Millimeterteilung einzustellen und in Lage A durch Änderung der Spannung eine Einstellung zu machen.

Aufgabe 7. Bestimmung des Durchlässigkeitsvermögens D einer durchsichtigen Platte G. Man vergleicht die beiden konstanten Lampen L_2 und L_1 in einer Lage (z. B. A) einmal direkt (Einstellung r_2), ein zweites Mal, nachdem man G zwischen L_2 und P senkrecht zur Bankachse aufgestellt hat (Einstellung r_2'). Dann ist $D = r_2'^2/r_2^2$.

Denn bei eingeschaltetem G verhält sich L_2 wie eine neue Lichtquelle L_2' (von der Lichtstärke DJ_2). Streng genommen ist auch noch die Dicke von G zu berücksichtigen (S. 201 und 232). Vgl. ferner f) auf S. 223.

Versuchsanordnung 3 wie auf S. 391.

Aufgabe 8 wie 7. Man schaltet G wieder zwischen P und L_2 ein und erhält $D = r_1^2/r_1'^2$.

Aufgabe 9. Bestimmung des Reflexionsvermögens von Spiegeln. Siehe S. 289; dort ist die mit L_a bezeichnete Lampe, wenn sie ohne Spiegel photometriert wird, also in der Bankachse liegt, identisch mit der hier als L_2 bezeichneten Lampe, während das Spiegelbild von L_a als eine neue Lichtquelle L_2' (von der Lichtstärke RJ_2) auftritt.

Aufgabe 10. Bestimmung der Albedo (des diffusen Reflexionsvermögens) M.

Methode von Sumpner (S. 21, Anm. 2; Tabelle II, S. 429). Man wählt als Lichtquelle L_2 einen kreisförmigen, senkrecht zur Bankachse aufgestellten Schirm aus der zu untersuchenden Substanz, gibt ihm durch eine seitlich aufgestellte Normallampe L_n eine konstante Beleuchtung E und macht durch Verschieben von L_1 in Lage A und B die photometrische Einstellung $[r_1]$. Ist S die Oberfläche von L_2 in Quadratmeter, so ist $M = \frac{J_1}{[r_1]^2} \cdot \frac{\pi r_2^2}{SE}$.

Beweis. Gemäß Gl. 1) auf S. 91 ist die auf das Quadratmeter bezogene Flächenhelle von S gleich ME/π, mithin $J_2 = SME/\pi$. Durch Substitution von J_2 in Gl. 1) erhält man obiges M.

Hierbei ist vorausgesetzt, daß der Kreis S das $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz befolgt und hinreichend klein gegen seinen Abstand von L_n und P ist. Ausführlicheres siehe Originalabhandlung.

Zum Vergleiche möge noch erwähnt werden die

Methode von Lambert[1]). (Fig. 201). Man beleuchtet mittels L_a (Kerze) einen Schirm ab bei O und den aus der zu untersuchenden Substanz hergestellten Schirm AB bei O'. Man bildet AB mittels der Linse C auf ab bei O'' ab und verschiebt L_a so lange, bis ab an den Stellen O und O'' gleich hell erscheint. Ist D' das (durchschnittliche) Durchlässigkeitsvermögen von C für die wirksamen Strahlen (s. Aufgabe 11 und 15) und ϱ der Radius von C, so ist nahezu

Fig. 201.

$$M = \frac{1}{D'}\left(\frac{d \cdot r'_a}{\varrho \cdot r_a}\right)^2.$$

Beweis. Die Beleuchtung von ab in O ist gleich J_a/r_a^2, die von AB in O' gleich $J_a/r_a'^2$, mithin nach Gl. 1), S. 91 die auf das Quadratmeter bezogene Flächenhelle von AB in O' $e = MJ_a/r_a'^2\pi$, demnach die Beleuchtung des Bildes von AB in O'' nach Gl. 10), S. 407 gleich $\varrho^2\pi D'e/d^2 = J_a/r_a^2$, woraus sich das gesuchte M ergibt.

Wie Zöllner[2]) zeigte, gibt die Lambertsche Methode zu kleine Werte, weil das von C auf ab neben O'' erzeugte Bild von L_a die Helligkeit bei O'' zu klein erscheinen läßt. Zöllner trennt deshalb C und L_a durch eine $\perp ab$ gestellte Scheidewand voneinander. Er erhält so für weißes Papier die in Tabelle II, S. 429 mitgeteilte Zahl; die übrigen Zahlen der Tabelle wurden durch relative Messungen gefunden.

Aufgabe 11. Bestimmung des (durchschnittlichen, vgl. S. 407, Anm. 1) Durchlässigkeitsvermögens D' einer Linse C für die wirksamen (direkten) Strahlen.

Man stellt eine gleichmäßig mit der Flächenhelle e leuchtende Fläche S und die Linse C (Lichtquelle L_2), beide senkrecht zur Bankachse, in solchen Entfernungen auf die eine Seite des Photometerschirmes P, daß S mittels C scharf auf P abgebildet wird. Auf die andere Seite von P setze man wieder L_1 und mache die Einstellung r_1. Hierauf ersetze man C durch eine ebenso große Blende B[3]), lasse S durch B (Lichtquelle L_2') hindurch P direkt beleuchten und mache die neue Einstellung $r_{1'}$. Dann ist $D' = r_{1'}^2/r_1^2$.

Beweis. Ist F die Linsenöffnung, so ist die Beleuchtung auf P mit C: nach Gl. 10), S. 407 $D'Fe/r_2^2 = cJ_1/r_1^2$, und ohne C: nach Gl. 1a), S. 94 $Fe/r_2^2 = cJ_1/r_{1'}^2$. Durch Division der beiden letzteren Gleichungen ergibt sich obiges D'.

Aufgabe 12. Es ist die Flächenhelle e (pro Quadratcentimeter) des hellsten, inneren Teiles einer Petroleumflamme zu bestimmen.

Man bringe die Mitte dieses Teiles, der sich ungefähr mit dem Kreis $A'B'$ in Fig. 194, S. 408 deckt, in den Brennpunkt einer senkrecht zur Bankachse gestellten Sammellinse (Lichtquelle L_2) und bestimme die Lichtstärke derselben J_2 in Richtung ihrer Achse mittels P und L_1. Alsdann ist, wenn F wieder die Öffnung der Linse ist, nach Gl. 13), S. 409 $J_2 = D'Fe$, so daß $e = J_2/D'F$.

---

[1]) Zöllner, Photometrische Untersuchungen, Leipzig 1865, S. 264.

[2]) Derselbe, Ebenda S. 268.

[3]) Falls die wirksame Öffnung von C durch eine unmittelbar davorgesetzte Blende begrenzt wird, läßt man natürlich nur C fort, ohne eine neue Blende B hinzuzufügen.

Beispiel. Es sei $D' = 0{,}85$, $F = 176{,}6$ qcm, $J_2 = 596$ HK; demnach ist $e = 3{,}97$, rund 4,0 HK[1]).

b) Es werde das Martenssche Polarisationsphotometer zugrunde gelegt.

Aufgabe 13 wie 2. Man macht eine photometrische Einstellung bei dem Drehungswinkel φ_2, der sich nach Gl. 1), S. 221 ergibt aus

$$tg\,\varphi_2 = \frac{r_n\,tg\,\varphi_n}{r_2}\sqrt{\frac{J_2}{J_n}}.$$

c) Es werde das Brodhunsche Straßenphotometer, Modell 1 zugrunde gelegt.

Aufgabe 14 wie 2. Man macht eine photometrische Einstellung bei der sich aus Gl. 1) und 2), S. 226 ergebenden Sektorengröße

$$f_2 = \frac{r_n^2 f_n}{r_2^2}\frac{J_2}{J_n}.$$

Beispiel. Es sei für $J_n = 24{,}88$ HK gefunden $f_n = 57{,}8^0$. Soll für $r_2 = r_n$ (also L_2 und L_n nacheinander an demselben Orte) bei $J_2 = 32$ HK gemessen werden, so hat man bei $f_2 = f_n J_2/J_n = 74{,}3^0$ einzustellen.

Aufgabe 15 wie 11. Man richte den Tubus B'' (S. 423) auf eine hinreichend weit entfernte, gleichmäßig leuchtende Fläche S und mache die Einstellung f. Sodann stellt man die Linse C, um ihre Brennweite von S entfernt, senkrecht zur Achse von B'' auf, so daß S genau am Orte der Okularblende abgebildet wird. Ist f' die neue Einstellung, so ist $D' = f'/f$.

Wenn C richtig aufgestellt ist, muß umgekehrt die Okularblende genau in der Mitte von S abgebildet werden.

Aufgabe 16 wie 7. Man stellt eine Linse C wie in voriger Aufgabe auf (Einstellung f). Man bringt sodann die zu untersuchende Platte G in den Gang der von C austretenden parallelen Strahlen (Einstellung f'). Alsdann ist $D = f'/f$.

Bei dieser Anordnung spielt die Dicke der Platte keine Rolle.

---

[1]) Die Flächenhelle des stehenden Gasglühlichts ist etwa 5,5 HK. Wegen der Flächenhelle des Kraters, des schwarzen Körpers, der Violleschen Einheit s. S. 139 und 140. Vgl. auch Grau, Elektrotechnik und Maschinenbau **25**, 295 (1907).

Tabellen.

I. Reflexionsvermögen von Metallen bei nahezu senkrechtem Einfall. (S. 20 und 265.)

Nach Hagen und Rubens.

Wellenlänge	450	500	550	600	650	700 $\mu\mu$
A) Reine Metalle						
Ag	0,906	0,918	0,925	0,930	0,936	0,946
Pt	0,558	0,584	0,611	0,642	0,663	0,701
Ni	0,585	0,608	0,626	0,649	0,659	0,698
Stahl, gehärtet	0,586	0,596	0,594	0,600	0,601	0,607
Stahl, ungehärtet	0,563	0,552	0,551	0,560	0,569	0,593
Au	0,368	0,473	0,747	0,856	0,882	0,923
Cu	0,488	0,533	0,595	0,835	0,890	0,907
B) Spiegelmetalle						
68,2 Cu, 31,8 Sn [1])	0,629	0,632	0,640	0,643	0,656	0,673
68,2 Cu, 31,8 Sn [2])	0,619	0,633	0,64	0,644	0,654	0,685
66 Cu, 22 Sn, 12 Zn [3])	0,624	0,625	0,634	0,642	0,651	0,680
60 Cu, 30 Sn, 10 Ag [4])	0,615	0,625	0,636	0,652	0,666	0,686
41 Cu, 26 Ni, 24 Sn, 8 Fe, 1 Sb [5])	0,491	0,493	0,483	0,475	0,497	0,549
2 Al, 1 Mg [6])	0,834	0,833	0,827	0,83	0,821	0,833
1 Al, 1,5 Mg [7])	0,834	0,825	0,821	0,838	0,849	0,844
1 Al, 2,75 Mg [8])	0,834	0,845	0,838	0,845	0,83	0,838
C) Glasspiegel						
hinten belegt mit Ag	0,793	0,815	0,825	0,825	0,835	0,845
bis	0,857	0,866	0,882	0,881	0,891	0,896
hinten belegt mit Hg-Amalgam	0,728	0,709	0,712	0,699	0,715	0,728

II. Albedo einiger Gegenstände. (S. 21 und 426.)

Nach Zöllner.

Gegenstand	Albedo
Frisch gefallener Schnee	0,783
Gewöhnl. weißes Schreibpapier	0,700
Weißer Sandstein	0,237
Tonmergel	0,156
Quarz-Porphyr	0,108
Feuchte Ackererde	0,079
Dunkelgrauer Syenit	0,078

Nach Sumpner.

Gegenstand	Albedo
Weißes Löschpapier	0,82
Weiße Wand	0,80
Gelbe Tapete	0,40
Blaue Tapete	0,25
Dunkelbraune Tapete	0,13
Schwarzes Tuch	0,012
Schwarzer Samt	0,004

[1]) Legierung von Rosse; [2]) Leg. von Brashear; [3]) bzw. [4]) Leg. von Schröder Nr. 1 bzw. 6; [5]) Leg. von Brandes u. Schünemann; [6]) bzw. [7]) und [8]) Leg. von Ludwig Mach, Nr. I bzw. Nr. VII und Nr. XII.

III. Gesättigter Wasserdampf.

e bedeutet Spannkraft in Millimeter Quecksilber bei t° Celsius.
Nach Thiesen und Scheel.

t	e	t	e	t	e
0°	4,58	10°	9,18	20°	17,41
+ 1	4,92	11	9,81	21	18,50
2	5,29	12	10,48	22	19,66
3	5,68	13	11,19	23	20,88
4	6,09	14	11,94	24	22,18
5	6,53	15	12,73	25	23,55
6	7,00	16	13,56	26	24,99
7	7,49	17	14,45	27	26,50
8	8,02	18	15,38	28	28,10
9	8,58	19	16,37	29	29,78
10	9,18	20	17,41	30	31,56

IV. Lichtstärke der Hefnerlampe.

Ist y die Lichtstärke der Hefnerlampe in HK bei dem Feuchtigkeitsgehalt x auf 1 cbm trockene, kohlensäurefreie Luft, so ist nach Gl. 3), S. 118,

$$y = 1{,}049 - 0{,}0055\,x.$$

x	y	x	y
0	1,049	10	0,994
1	1,043	11	0,988
2	1,038	12	0,983
3	1,032	13	0,977
4	1,027	14	0,972
5	1,022	15	0,966
6	1,016	16	0,960
7	1,010	17	0,954
8	1,005	18	0,949
9	0,999	19	0,944
10	0,994	20	0,938

Wegen teilweiser Abänderung der Tabelle II auf S. 146 — Vergleich der gebräuchlichsten Lichteinheiten — siehe Vorwort, Absatz 2.

V. Namen und Zeichen der photometrischen Größen und Einheiten.

Vgl. E. T. Z. **18**, 474 (1897); J. f. G. u. W. **40**, 548 (1897).

Größe		Einheit	
Name	Zeichen	Name	Zeichen
Lichtstärke	J	Kerze (Hefnerkerze)	HK
Lichtstrom	$\Phi = J\omega = \frac{J}{r^2} s$	Lumen	Lm
Beleuchtung	$E = \frac{\Phi}{s} = \frac{J}{r^2}$	Lux (Meterkerze)	Lx
Flächenhelle	$e = \frac{J}{\sigma}$	Kerze auf 1 qcm	—
Lichtabgabe	$Q = \Phi \mathfrak{T}$	Lumenstunde	—

Dabei bedeutet

ω einen räumlichen Winkel;

s eine Fläche in Quadratmetern; σ eine Fläche in Quadratcentimetern, beide senkrecht zur Strahlenrichtung;

r eine Entfernung in Metern;

$\mathfrak{T}$ eine Zeit in Stunden.

VI. Vergleich verschiedenfarbiger Lichtquellen.

Nach L. Weber.

$\frac{Gr}{Ro}$	k	$\frac{Gr}{Ro}$	k	$\frac{Gr}{Ro}$	k	$\frac{Gr}{Ro}$	k	$\frac{Gr}{Ro}$	k	$\frac{Gr}{Ro}$	k
0,0	—	1,0	1,00	2,0	1,60	3,0	2,02	4,0	2,33	5,0	2,60
0,1	—	1,1	1,08	2,1	1,65	3,1	2,05	4,1	2,36	5,1	2,62
0,2	—	1,2	1,15	2,2	1,70	3,2	2,08	4,2	2,39	5,2	2,64
0,3	0,50	1,3	1,22	2,3	1,75	3,3	2,11	4,3	2,41	5,3	2,67
0,4	0,56	1,4	1,28	2,4	1,80	3,4	2,15	4,4	2,44	5,4	2,69
0,5	0,64	1,5	1,34	2,5	1,84	3,5	2,18	4,5	2,47	5,5	2,71
0,6	0,72	1,6	1,40	2,6	1,88	3,6	2,20	4,6	2,49	5,6	—
0,7	0,80	1,7	1,46	2,7	1,92	3,7	2,24	4,7	2,52	5,7	—
0,8	0,87	1,8	1,50	2,8	1,96	3,8	2,27	4,8	2,55	5,8	—
0,9	0,94	1,9	1,55	2,9	1,99	3,9	2,30	4,9	2,57	5,9	—

VII. Tabelle für eine gerade Photometerbank.

Lichtstärkenverhältnis $p = \frac{J}{J_1} = \frac{r^2}{r_1^2}$, wenn $r + r_1 = 2500$ mm ist [Gl. 1, S. 311].

r_1 dm	00 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm	90 mm
2	132	119	107	97,4	88,7	81,0	74,2	68,2	62,9	58,1
3	53,8	49,9	46,4	43,2	40,4	37,7	35,3	33,1	31,1	29,3
4	27,6	26,0	24,5	23,2	21,9	20,8	19,7	18,7	17,7	16,8
5	16,0	15,2	14,5	13,8	13,2	12,6	12,0	11,5	11,0	10,5
6	10,0	9,60	9,19	8,81	8,45	8,10	7,77	7,46	7,16	6,88
7	6,61	6,36	6,11	5,88	5,66	5,44	5,24	5,05	4,86	4,69
8	4,52	4,35	4,20	4,05	3,91	3,77	3,64	3,51	3,39	3,27
9	3,16	3,05	2,95	2,85	2,75	2,66	2,57	2,49	2,41	2,33
10	2,25	2,18	2,11	2,04	1,97	1,91	1,85	1,79	1,73	1,67
11	1,62	1,57	1,52	1,47	1,42	1,38	1,33	1,29	1,25	1,21
12	1,17	1,14	1,10	1,07	1,03	1,00	0,969	0,938	0,908	0,880
13	0,852	0,825	0,799	0,774	0,749	0,726	0,703	0,680	0,659	0,638
14	0,617	0,598	0,578	0,560	0,542	0,524	0,507	0,491	0,475	0,459
15	0,444	0,430	0,416	0,402	0,389	0,376	0,363	0,351	0,339	0,328
16	0,316	0,306	0,295	0,285	0,275	0,265	0,256	0,247	0,238	0,230
17	0,221	0,213	0,206	0,198	0,191	0,184	0,177	0,170	0,164	0,157
18	0,151	0,145	0,140	0,134	0,129	0,123	0,118	0,114	0,109	0,104
19	0,100	0,095	0,091	0,087	0,083	0,080	0,076	0,072	0,069	0,066

VIII. Tabelle für $p = \frac{10}{r_1^2}$ [Gl. 3), S. 313, für $J_1 = 10$].

r_1 m	00 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm	90 mm
0,3	111	104	97,7	91,8	86,5	81,6	77,2	73,0	69,3	65,7
0,4	62,5	59,5	56,7	54,1	51,7	49,4	47,3	45,3	43,4	41,6
0,5	40,0	38,4	37,0	35,6	34,3	33,1	31,9	30,8	29,7	28,7
0,6	27,8	26,9	26,0	25,2	24,4	23,7	23,0	22,3	21,6	21,0
0,7	20,4	19,8	19,3	18,8	18,3	17,8	17,3	16,9	16,4	16,0
0,8	15,6	15,2	14,9	14,5	14,2	13,8	13,5	13,2	12,9	12,6
0,9	12,3	12,1	11,8	11,6	11,3	11,1	10,9	10,6	10,4	10,2
1,0	10,0	9,80	9,61	9,43	9,23	9,07	8,90	8,73	8,57	8,42
1,1	8,26	8,12	7,97	7,83	7,69	7,56	7,43	7,30	7,18	7,06
1,2	6,94	6,83	6,72	6,61	6,50	6,40	6,30	6,20	6,10	6,01
1,3	5,92	5,83	5,74	5,65	5,57	5,49	5,40	5,33	5,25	5,17
1,4	5,10	5,03	4,96	4,89	4,82	4,76	4,69	4,63	4,57	4,50
1,5	4,44	4,39	4,33	4,27	4,22	4,16	4,11	4,06	4,01	3,96

IX. Vergleich zwischen den verschiedenen Lichtquellen in wirtschaftlicher Hinsicht usw. (Vgl. S. 360.)

1	2	3	4	5	6
Lichtquelle	Mittlere räumliche Lichtstärke in IK	Auf 1 IK mittlere räumliche Lichtstärke und auf 1 Brennstunde			
		Verbrauch (spez. Verbr., S. 327) durchschnittlich $\mathfrak{G}_s$	Die $\mathfrak{G}_s$ äquivalente Energie (Ökonomie, S. 98) in Wattstd.	kg-Kal.	Preis in Pfg.
1. Hg-Lampe aus Quarz bei höherer Beanspruchung: (174 bis 197 Volt; 4,2 Ampere; Dampfdruck etwa 1 Atm.), nach Versuchen an *einer* Lampe	2500—3000	0,27 Wattst.	0,27	0,23	0,014
2. Flammenbogenlampe	500—1800	0,4 „	0,4	0,34	0,020
3. Intensiv-Gasglühlicht mit stehendem Glühk.	150—800	1,5 Liter	8,9	7,6	0,020
4. Gewöhnliches Gasglühlicht mit hängendem Glühkörper .	60—150	1,5 „	8,9	7,6	0,020
5. Gewöhnliches Gasglühlicht mit stehendem Glühkörper . .	60—90	1,9 „	11,3	9,7	0,025
6. Hg-Lampe aus gewöhnlichem Glas bei norm. Beanspruchung (40 bis 70 Volt; 3,5 Ampere)	250—600	0,5 Wattst.	0,5	0,43	0,025
7. Petroleumglühlicht .	40—500	1,2 Gramm	15	13	0,030
8. Gleichstrombogenlampe mit gewöhnlichen Kohlen . . .	300—600	1,0 Wattst.	1,0	0,86	0,050
9. Acetylenglühl. (wegen Durchschlagens wenig im Gebrauch) . . .	etwa 100	0,4 Liter	6,9	5,9	0,060
10. Spiritusglühlicht . .	20—200	1,8 Gramm	11,3	9,7	0,063
11. Osramlampe	20—40	1,4 Wattst.	1,4	1,2	0,070
12. Petroleumlampe . .	10—30	3,4 Gramm	44	37	0,085
13. Osmiumlampe . . .	25	1,9 Wattst.	1,9	1,6	0,10
14. Nernstlampe	20—200	2,4 „	2,4	2,1	0,12
15. Leuchtgas-Rundbrenner	etwa 16	10 Liter	59	51	0,13
16. Acetylenlicht	8—180	1,0 „	17	15	0,15
17. Gewöhnliche Kohlenfadenlampe	8—40	3,4 Wattst.	3,4	2,9	0,17
18. Leuchtgas-Schnittbr.	etwa 10	17 Liter	101	87	0,22

Hierbei wurde angenommen:

die Verbrennungswärme von 1 cbm Leuchtgas zu 5100 kg-Kal., von 1 kg Spiritus zu 5410 kg-Kal., von 1 kg Petroleum zu 11 000 kg-Kal., von 1 cbm Acetylen zu 14 800 kg-Kal.

1 kg-Kal. zu 1,164 Wattstunden,

der Preis von 1 cbm Leuchtgas zu 13 Pfg., von 1 kg Spiritus zu 35 Pfg., von 1 kg Petroleum zu 25 Pfg., von 1 cbm Acetylen zu 150 Pfg., von 1 Kilowattstunde zu 50 Pfg.

X. Winkel $\vartheta = arctg \frac{x}{h}$ in Bogengraden. [Vgl. Gl. 8), S. 363.]

$\frac{x}{h}$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0	5,7	11,3	16,7	21,8	26,6	31,0	35,0	38,7	42,0
1	45,0	47,7	50,2	52,4	54,5	56,3	58,0	59,5	60,9	62,2
2	63,4	64,5	65,6	66,5	67,4	68,2	69,0	69,7	70,3	71,0
3	71,6	72,1	72,6	73,1	73,6	74,1	74,5	74,9	75,3	75,6
4	76,0	76,3	76,6	76,9	77,2	77,5	77,7	78,0	78,2	78,5
5	78,7	78,9	79,1	79,3	79,5	79,7	79,9	80,0	80,2	80,4

XI. Horizontale Beleuchtung $p = \frac{100}{(1 + x'^2)^{3/2}}$.

[Vgl. Gl. 11), S. 364.]

$\frac{x'}{m}$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	100,0	98,5	94,3	87,9	80,0	71,6	63,0	55,0	47,6	41,1
1	35,4	30,4	26,2	22,7	19,6	17,1	14,9	13,0	11,5	10,1
2	8,94	7,95	7,09	6,34	5,69	5,12	4,63	4,19	3,80	3,46
3	3,16	2,89	2,65	2,44	2,25	2,07	1,92	1,78	1,65	1,53
4	1,43	1,33	1,24	1,16	1,09	1,02	0,96	0,90	0,85	0,80
5	0,75	0,71	0,67	0,64	0,60	0,57	0,54	0,52	0,49	0,47

XII. Photometrischer Vergleich zwischen Hefnerlampe, 10-Kerz.-Pentanlampe von Vernon Harcourt und Carcellampe.

[Berichtigung der Tabelle II auf S. 146; vgl. J. f. G. u. W. 50, 752 (1907).]

Es bedeuten die fettgedruckten Zahlen die von der Internationalen Lichtmeßkommission bei ihrer in Zürich vom 18. bis 20. Juli 1907 erfolgten zweiten Zusammenkunft *endgültig* festgelegten Verhältniszahlen (vgl. S. 148, Zeile 3 von unten, ferner Vorwort, Absatz 2); die übrigen Werte sind hieraus durch Umrechnung abgeleitet. Die Angaben in Liter bedeuten die als normal angenommenen Luftfeuchtigkeiten; als normaler Luftdruck gilt 760 mm.

	Hefner	Harcourt	Carcel
Hefner (8,8 Liter)	1	0,091$_5$	0,093$_0$
Vernon Harcourt (10 Liter) . .	**10,9$_5$**	1	**1,02$_0$**
Carcel (10 Liter)	**10,7$_5$**	0,98$_0$	1

Die Kommission schätzt die Genauigkeit der von ihr angenommenen Werte auf $\pm$ 1 Proz.

NAMEN- UND SACHREGISTER.

Die arabischen Zahlen bedeuten die Seitenzahlen, die römischen, wenn nichts hinzugefügt ist, die Nummern der Tabellen auf S. 429 bis 434.
Abkürzungen: Ph. = Photometer; Phie. = Photometrie; phr. = photometrisch.

Abblenden fremden Lichts 313.
Abney, Flächenhelle d. Kraters 138.
— u. Festing, rotier. Sektor 207; Kratertemper. 343.
Absorbier. Körp. z. Lichtschwächg. 201.
Absorption 16, selektive 54, 65, 202; Verhältnis z. Emission 38; s. auch Lichtverlust.
Absorptions-apparat 264.
— -faktor usw. 398.
— -gesetz 397.
— -messungen 263, 398.
— -vermögen, Berechng. 400; physiologisches 58 ff., 63, 65, 69.
— -wirkungen 16, 58.
Acetylenbrenner, -lampen, 8, 131, 238, 357, IX; Strahlung 50, 52.
Achse, optische, d. Ph.-bank 310.
Albedo 21, Messg. 426, II.
Allactin 4.
Allard, phr. Meth. 238, Einführg. d. mittl. räuml. Lichtstärke 270.
Americ. Instit. of El. Engineers, Einführung d. Hefnerlampe 105, Vorschlag für eine Einheitslampe 132.
Amylacetat 104, Einfl. 113, Prüfg. 416.
Ändrgn., rel. u. proz., 387, Berechng. 389 ff.
Ångström 26, $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Ges. 85, 88; Strahlungsmessgn. 50, 51, 53.
Annäherungsformeln f. d. mittl. räuml. Lichtst. 272, 276; f. d. Rechn. m. klein. Größ. 388.
Äquivalent, mechan. d. Lichteinheit 52.
Arago, Polarisation 83, 203, 397; Unterschiedsempfindlichk. 155.
Argand, Prinz. d. dopp. Luftzufuhr 6.
Argandbrenner 7, 152, 351; Strahlg. 50.
Armaturen, Lichtverlust 357, 360.
Arons, Hg-Lampe 10.
Aschkinass, Absorpt. im Auge 58.
— s. auch Rubens.
Assmann, Aspir.-psychrom. 117, 322.
Äther-Benzollampe 130, 145, 383.
Aubert, Talbots Ges. 206, rotier. Sekt. 207.
Auer, Gasglühl. 8, Osmiumlampe 9, 340.
Auge, als opt. App. 56; Empfindlichk. f. Licht verschied. Wellenläng. 63 ff., f. Helligk.- u. Kontrastuntersch. 154 ff.; als Energiemesser 67 ff.; physiolog. Wirkgn. d. Lichts 56 bis 73.
Ausstrahlungswinkel 31.
Austrittspupille 405.
Auswählend s. selektiv.
Ayrton, H., Lichtbogenspannung 343.
Ayrton, W. E., s. Perry.

Babinet, Ph. 217, rotier. Sektor 207.
v. Baeyer s. Gehrcke.
Bankachse 310.
Bannowsche Proben 114, 416.
Bechstein, Flimmerph. 246.
Beckmann, Wiensche Spektralgl. 46.
Becquerel, Ph. 215, Temp.-messg. 421.
Beer, Absorptionsges. 398; $\cos\varepsilon$-Ges. 80, 81; Ph. 215.
Beglaubigg. d. Hefnerlampe 112, 411 ff.
Beleuchtung (Beleuchtungsstärke) 68, 74, V; Einheit 147, 149; horizontale 362 ff., 370, XI; mittl. horiz. 363 ff., 374; normale 362 ff.; vertikale 362 ff., 374; Zahlenwerte 371.
Beleuchtungs-kurven 365.
— -linse 407.
— -messer v. Blondel u. Broca 215; Brodhun 423; Classen 223; Houston u. Kennelly 244; Krüss 192, 211; Martens 194, 221; Mascart 213; Preece u. Trotter 210; Weber 186 ff., 242; Wingen 193, 211.
Benzinlampe 152, 184, 190, 194, 243.
Benzol-Alkoholmischgn. 131.
Bernard, Ph. 215.
Bestrahlung(-sstärke) 14.
Beugung des Lichtes 191.
v. Bezold, Dunkelspektrum 71.
Blanc, Le, phr. Vergl. 145.
Blenden, z. Abblend. fremd. Lichts 313; als äquival. Leuchtfläche 93, 105; z. Begrenzg. d. Strahlengang. 405; verstellb. 199, 211; s. auch Diaphragm.

Bloch, Beleuchtg. 369, 374; Kugelph. 304.
Blondel, Alkoh.-Benzollampe 131; Annähergsform. 346; Äthylenlampe 132; Beleuchtgsprobl. 362; geg. d. Carcellampe 109; $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Ges. 88; Kongreßber. 147; Kraterlampe 138; Lichtstrom 68 u. 147; Lichtverlust 344; Lumenmet. 297; orthotrop 79; Photomesom. 304; Substitutionsverfahr. 238; Voltalampe 346.
— u. Broca, Universalph. 214, 423.
— u. Jigouzo, Messgn. an Bogenlampen 345, 347, 348.
— u. Psaroudaki, Holophanglocken 344.
Bogenlampe 5, 9, 342—351, IX; Erklärg. d. Lichtverteilg. 343; spektralphr. Vergl. 262; Strahlg. 5, 50.
— -kohlen 10, 342, 348; Einfl. 345, 347.
Böhm, Gasglühl. 352, Metallfadenl. 342.
Boll, Sehpurpur 57.
Bolometer 24, 137.
Bose s. Nernst.
Boudouard s. Chatelier.
Bougie décimale 133, internat. Einheit 147, Vergl. m. and. Einh. 140—145.
Bouguer, Blendenmeth. 199; $\cos\varepsilon$-Ges. 80; $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Ges. 84, 85; diffus. Reflexion 19; Heliom. 212; Ph. 161; Unterschiedsempfindlichk. 155.
Brace, 252, Spektralph. 267.
Bragstad, 220-V-Lampen 336.
Brechungs-exponent 17.
— -ges. v. Snellius 17, Brewster 202.
Bremer, Flammenbogenlampe 10.
Brewster, Dunkelspektr. 71; Ges. 202, 396.
Broca, Lichtempfindg. 58, Naphtalinlampe 130.
— s. auch Blondel.
Brodhun, Purkinjesch. Phänomen 61, 69, 230; rotier. Sekt. 207, Ablesungsvorrichtg. dazu 209; rot. Spiegelapp. 331, 381, 426; Sehschärfenmeth. 241; Sektorenvorrichtg. 209; Spiegelanordnung 292, 423; Straßenph. 224, 285, 381, 423, 428.
— u. Liebenthal, Einfl. d. Amylacetats 114, d. Dochtrohrs 115, 116; opt. Flammenmesser 113.
— u. Schönrock, Trennungslinie im Gesichtsfelde von Ph. 191.
— s. auch König, Lummer.
Brücke, Bezeichng. heterochrom. Phie. 231; Ph. 183; phr. Meth. 239, 241; Talbots Ges. 206.
Bunsen 25, -brenner 7, 352; Ph. 165; Substitutionsmeth. 167.
Bunte, tabellar. Vergl. v. Lichteinh. 143—146, 148; Theorie d. Gasglühlichts 352.
Capps, Helligk. u. Spaltweite 252.
Carcellampe 6, 104, 107; Spektrum 256; Vergl. m. and. Einheitsl. 140 ff., XII.
Cauchy, Dispersionsform. 254.
Ceroxyd 5, Einfluß 353.
Chatelier, Le, Temp.-messgn. 212, 421.
— u. Boudouard, Gasglühlicht 352.
Chwolson, $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz 88.
Classen, Beleuchtgsmesser 223.
Clausius-Kirchhoff, Gesetz 83.
Cohn, Beleuchtg. z. Lesen 193.
Conroy, Ph. 164, Reflexionsmessg. 266.
Cornu, Blendenmeth. 200, Ph. 212.
Cörper, Reflektor 346.
Corsepius, Kugelph. 304.
$\cos i$-Gesetz 29, 75, 80.
$\cos\varepsilon$-Ges. 77, Prüfg. 80, Theor. 81.
$\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Ges. f. diffus reflekt. Körp. 78, Prüfg. 84, Theor. 87; f. diffus durchlassende Körp. 87, Prüfg. 88.
Crova, $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Ges. 88; Glühgrad 137; Ph. 212, 259; phr. Meth. 233; rotier. Lampe 332; Temp.-messg. 421.
— u. Lagarde, phr. Meth. 241, spektralphr. Messgn. 255.
Czapski, mittelb. Lichtstrahlg. 402.

Dämmerungswerte 245.
Dauerprüfg. v. Lamp. 336—360, 387.
Davy, Lichtbogen 9, 10.
Desains s. Provostaye.
Deutsche Lichtmeßkomm. s. folg. Angab.
Deutscher Verein v. Gas- u. Wasserfachmännern, Abgabe v. Amylacetat 416; Beglaubigung der Hefnerlampe 411; Beschlüsse 148; deutsche Kerze 106, Festsetzg. ihr. Lichtstärke 141; Normalph. 311; Ph.-raum 326; Vgl. v. Lichteinh. 141, 145; vergleich. Prüfg. v. Gasglühlichtkörp. 354; Vorschr. f. d. Prüfg. v. Gasglühlichtkörp. 384, v. Leuchtgas 382.
Diaphragmenph. 211 ff.
Dibdin, Bunsenschirm 166, Ph. 286, phr. Vergl. 145.
Dietrich, Vierordtsch. Doppelsp. 257.
Diffuse Durchlässigk. s. Durchl.
Doppelspalt 257.
Dovesches Prisma 236.
Draper, Satz 4, Platinlampe 132.
Drehschmidt, Beleuchtgsmessgn. 375, Holophanglock. 344, Intensivbrenner 356, Spiegelapparat 292.
Drude, Kirchhoffsch. Ges. 39; Reflex. v. Metall. 84, 266; Strahlgsintensit. 32.
Dubosq, Babinetsches Ph. 217.
Dumas u. Regnault, Vorschr. 108.
Dunkelspektrum, farbloses, 71.
Durand u. Jigouzo, phr. Vergl. 141.
Durchlässigkeit, diffuse u. regelmäßige, 16, 21; vollkomm. diff., 88.
— -skoeffizient 88, 252; Berechng. 91.

Durchlässigkeitsvermögen, diff., 16, 21 ff.
—, regelmäßiges, 16, 21 ff.; Berechng. 400; Messg. 223, 426, 428.
—, —, f. direkte Strahlen 18, 401, 427 uf.
Durchschein. Körp. 23, 344; $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Ges. 87.
Durchsichtige Körper 18, 21, 396 ff.
Dyke, Ph. v. Matthews 308.

Ebert, 5, Empfindlichkeit d. Auges 66.
Edgertonlampe 109.
Ehlers, Doppelbrechung 259.
Einfallswinkel 29, 75.
Einheit d. Entferng. 28, d. Oberfläche 32; s. auch Maßsystem 25.
Einheiten, phr., 149, 150, V.
Einheitslampen 102—151; Vergleich 140—146, XII.
Eintrittspupille 405.
Eisler, schwarzer Körper 95, 99.
Eitner, Benzinkerze 152.
Elektr. Bogenlampe s. Bogenlampe.
Elektrotechn. Verein, Beschlüsse 148 ff.
Elster, S., Diff.-ph. 164, Winkelph. 286.
v. Emden, Grauglut 4.
Emission, Verhältn. z. Absorpt. 38.
Emissions-vermögen, Definition 32; andere Defin. 32, 33; Einzel- 35, 43 ff.; Gesamt- 36, 43 ff.; maximales 43.
— -winkel 31.
Empfindlichkskoeff. des Bunsenschen Photometerschirmes 171.
Energetisch, Definition 14.
Energie, physik., 13; physiologische, 58.
— -Helligkeitswerte 66.
— -messer 24, das Auge als — 67 ff.
— -strom 14; gesamt., 24, 49, dessen Verhältn. z. Licht 50, dess. Zerlegg. 35; sichtbarer, 14.
Entfernungsgesetz 28, 74, 80.
Erg 25.

Fabry, phr. Meth. 233.
Farbe u. Schwingungsdauer 12, 70.
Farben-blinde 73, phr. Einstellgg. 230.
— -empfindung 12, Theorie 70 ff.
— -gemisch, Lichtstrom eines — 69.
— -zerlegung 250.
Farbloses Licht 2, 69; Medium 22.
Fechner, Unterschiedsempfindlk. 155.
— s. auch E. H. Weber.
Fehler, relative u. prozentuelle, 387.
— -berechnung 169 ff., 391 ff.
Féry, Acetylenlampe 132; Temp.-messg. 352, 420.
Fessenden, Acetylenlampe 132.
Festing s. Abney.
Feuchtigk. 116, jährl. Schwankgn. 117; s. auch Luft.
Feuchtigkeitsmesser 322.
Feussner, Spannungsmessgn. 317.
Fick, Talbots Ges. 206.
Fizeau u. Foucault, Blendenmeth. 213.
Flächenelement auf einer Kugel 394.
Flächenhelle 65, 68; Definit. 76, 252, s. auch 90; Berechng. 91; Einheit 150, V; Messg. 94, 212, 215, 222, 427; Zahlenwerte 428.
Flammen-bogenlampe 5, 10, 348, IX.
— -höhe, Einfl. 111, 115, 124, 128, 132.
— -messer, opt., nach Brodhun-Liebenthal 113; Krüss 107, 113, 414, 418; Martens 113.
Fleming, Spiegelapp. 296, Vergl. zw. Gleich- u. Wechselstrom 347.
Flimmern 205, 244.
Flimmerph. 245—250.
Folgerungen aus d. Kirchhoffsch. Ges. 39, d. Strahlgsges. d. schwarz. Körp. usw. 49, d. phr. Ges. 89.
Foucault 10, Ph. 161, Prisma 203.
— s. auch Fizeau.
Fourier, $\cos\varepsilon$-Ges. 81, diffus. Refl. 19.
Fovea centralis 4, 57, 73, 230.
Franklin s. Nichols.
Franklin Instit., Lampenstativ 297.
Fraunhofer, spektralphr. Messg. 255.
Fresnel, 410; Reflex.-ges. (Formeln) 82, 396; Prisma 210; Schwinggsebene d. Lichts 40, 203, 397.
Frey u. Kries, Zwillingsprisma 191.
Fuchs, Interferenzph. 197.

Gasdruckregler 320, 387.
Gasglühlicht (-App., -Brenner, -Lamp.) 8, 352 ff., 428, IX; hängendes 356; stehend. 354; Theorie 352.
— -körper, vergleichende Prüfg. 354, Prüfgsvorschr. 384.
— -regulierdüsen 353.
Gas Referees, 10-Kerz.-Pentanlampe 105, 143; Ph. 162; Vorschr. 129, 382.
Gaud, spektralphr. Vergl. 263.
Geer, Strahlungsmessung 50.
Gefärbter Körper 20, 22, 23.
Gehrcke u. v. Baeyer, Hg-Lampe 350.
Gemischte Strahlung 2, 19.
Genauigk. d. phr. Einstellg., Berechng. 169.
Gips 21, $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz 85 ff.
Giroudlampe 104, 110, 152.
Glan, Prisma 236, Spektralph. 258.
Glas, Absorption 398; Durchlässigk. 22; mattiertes, $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Ges. 87, 88.
Glatte Oberfläche 17.
Glazebrook, Spektralph. 259.
Gleichheits-ph. v. Lummer u. Brodhun 172, 239, s. auch 402, 410; v. Martens 190.
— -prinzip 157.
Gleichstrombogenlampe 342 ff., 348, 349.
Glocken, Lichtverlust 344.
Glühlicht 5, 8.

Godard, cos ε · cos i-Gesetz 85.
Grauer Körper 20, 22.
Grauglut 3, 72.
Gray s. Wilson.
Grosse, Mischgs.-Photometer 236, 239.
Grundgesetz Lamberts, photometr. 26, 73; zusammengesetztes 33, 76.
Guthrie, rotierender Sektor 207.

Hagen u. Rubens, Absorptionsges. 398; Durchlässigk. v. Silber 22; Reflexionsvermög. v. Metall. 20, 265, 266, I; spektralphr. Anordng. 264.
Hähnlein, absorbier. Flüssigk. 202, Sehschärfenmethode 241.
Hammerl, rotierender Sektor 207.
Harcourt, Pentanlampen 104, 122 ff.
Hartley, Meth. d. Winkelph. 285.
v. Hefner-Alteneck 9; Amylacetat 104, 114; Benzol-Alkohollampe 131; geg. d. bougie décim. 147; Hefnerlampe 111, 411; Lichtverlust 344; Prisma 166; Spiegelapp. 289, 291; Visier 113, 414, 417.
Hefnerkerze 111; vollständ. Defin. 118.
Hefnerlampe 111; Beglaubigung 411; internat. Gebrauchsnormal 147; Strahlg. 50, 53, 100; Tab. üb. beglaubigte — 112; Vergl. m. anderen Einheitsl. 140—146, XII; s. auch IV.
Hegener, Voltalampe 10.
Heim, Lampenstativ 297.
Heizwert 320; Einfl. a. Gasglühl. 355, 381.
Helligkeit 57 ff., 61 ff., 76.
— v. Bildern 406, d. Spektrums 252, Verteilg. d. — im Spektrum 255.
Helmholtz, H. v., 2, 12; Absorpt. im Auge 58; Talbotsch. Ges. 205, 206; Unterschiedsempfindlichkeit 155.
—, R. v., Temperaturstrahlg. 4, physik. Wirkungsgrad 52.
Hemisphär. Lichtstärke s. Lichtst.
Heraeus, Quarz-Hg-Lampe 10, 350, IX.
Hering, Farbentheorie 71.
— u. Hillebrand, Dunkelspektr. 71.
Herschel, 196, Sternphotometer 213.
Herschkowitsch, Spiegelappar. 294.
— s. auch Schott.
Hertz, 3, Versuche 11.
Heterochrome Photometrie 231.
Hewitt, Hg-Lampe 10.
Hilfs-app. f. phr. Messgn. 315—323.
— -lichtquelle 151.
Hillebrand s. Hering.
Holborn u. Kurlbaum, opt. Pyrom. 421; Temperaturmessgn. 336, 352.
— u. Valentiner, Temp.-messgn. 419.
Holländ. Lichtmeßkomm., Äth.-Benzollampe 130; Vergl. v. Lichteinh. 141, 145; Vorschr. 383.
Holophanglocken 344, 373.
Homogene Strahlung 2.
Houston u. Kennelly, Beleuchtungsmesser 244, Integralph. 309.
Howell, metallisiert. Kohlenfad. 337.
Hoxie s. Stewart.
Hrabowski, Seitenlichtapparat 378.
Hüfner, Spektralphotometer 259.
Hutchins, cos ε · cos i-Ges. 85; Strahlungsmessungen 50, 53.

Ingersoll, Strahlungsmessung 50.
Innenräume, Beleuchtung von — 375.
Integralphotometer v. Matthews 306.
Intensität, der Wellenbewegung 14; Strahlungs- 32.
Interferenzph. 196, 197, 217.
Intermittenz des Lichts 205, 206.
Internationale Kongresse 1, 148 ff.; Lichtmesskomm. 140, 148; Vereinbargn. üb. phr. Größ. u. Einh. 146 ff.
Iridiumlampe 342.
Iris 56, bei optischen Systemen 405.
Isoluxkurven 366.

Jablochkoffkerze 10.
Jandus, eingeschloss. Lichtbog. 10.
Janet, 220-V-Lamp. 336; s. auch Pérot.
Jigouzo, s. Blondel, Durand.
John, Theorie d. Gasglühlichts 352.
Joly, Photometer 164.
Jouaust s. Laporte.
Junkers, Kalorimeter 320, 355.

Kalorie 25, 321, IX.
Kalorimeter 25, 320.
Kandelaberhöhe 361, günstigste 372 uf.
Keateslampe 109.
Keilförmige Photometer 163.
Kerze 6, 104; deutsche 106; englische: alte (Walrat) 105, neue (Pentaneinh.) 146; Hefner- 111, 119; München 106.
— spektralphr. Messg. 262; Strahlg. 50, 52, 53, 100, 101; Temp. 357; phr. Vergl. 141—146.
Kerzenteilung 286, 311 ff., 379, 382.
Killing, Gasglühlicht 352.
Kirchhoff, Emission u. Absorpt. 38, Emissionsvermög. 33, Intensität 15, Stromverzweigg. 316 uf., schwarzer Körper 20.
— -Clausius, Gesetz 83.
Kirkham u. Sugg, phr. Vergl. 145.
Klar 17.
Kleiner, Talbotsches Gesetz 206.
Knott, Swans Photometer 172.
Kohlenfaden, Präparieren 8, 335; Metallisieren 337.
— -lampe 8, 328—337, IX; Einfl. v. Spanng. u. Stromstärke 152, 317, 336; Lebensdauer 336; Lichtverteilg. u. Meßmeth. 328—334; Lieferungsbedingungen 337; als Normallampe 154, 232, 330; Ökonomie 98; spektralphr. Vergl. 262; Strahlg. 50,

52, 97, 99; Vorschr. f. d. Prüfg. 378; als Zwischenlqu. 152; s. auch S. 424 ff.
Kohlensäure, Einfluß 120.
Kohlrausch 315, Strahlgskonstant. 45, psychrometr. Konst. 322.
Kollimator 250.
Kompensations-methode, el., 315 ff.
— -photometer 235 ff.
König, A., Empfindlichk. d. Aug. 66; Farbentheorie 71; phr. Einstellg. v. Farbentüchtig. u. Farbenblind. 230; rotier. Sekt. 207; Spektralph. 259.
— u. Brodhun, Unterschiedsempfindlichkeit 155.
Königsberger, Spektralph. 259.
Kononowitsch, $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Ges. 86.
Konstantenbestimmg. f. Ph. 178, 188, 226.
Kontrastphotometer von Lummer-Brodhun 180, Martens 191.
Koordinaten, sphärische, 394.
Korrektionen, relative und proz., 387.
Körting u. Mathiesen 10, Anleitg. zum Projektieren 378.
Köttgen, spektralphr. Vergl. 260.
Kraterlicht-Einheitslampe 138.
Kries, 238; Farbentheorie 71, 73, 230.
— s. auch Frey.
Krüss, G. u. H. 259, 398.
— H., Absorption 398; Ändergn. an Ph. 166, 176, 193, 211, 236, 286, 295; Beleuchtungsmesser 192, 211; Doppelspalt 258; Entwurf von Beleuchtungsanlagen 375; Flimmerph. 248, s. auch 245; Kerzenwage 106; Kompensat.-ph. 235; Lampenstativ 297; opt. Flammenmesser 107, 113, 184, 414, 418; phr. Vergl. 145; Schattenwerfvorrichtung 288; Spiegelapp. 291, 293; Starklichtphie. 422.
Kubizierapparat 319.
Küch u. Retschinski, Hg-Lampe 351.
Kugelphotometer von Ulbricht 301 ff.
Kühne, Sehpurpur 57.
Kurlbaum, absol. Strahlgsmessgn. 25, 45; Kerzen-strahlung 101, 235, -temperatur 357.
— u. Schulze, Temperaturmessg. 352.
— s. a. Holborn, Lummer, Rubens.

Laboratoire central, 140 ff.
— d'essais, 140 ff.
Lagarde s. Crova.
Lambert, Absorptionsges. 397; Albedo 21, Messg. 427; Ph. 160; s. auch photometrische Gesetze.
Lampen s. Lichtquellen.
— -achse 268.
— -mitte 75.
Langley 24; Empfindlichk. d. Aug. 63 ff.; Lichtempfindg. 58; Redukt. auf d. Normalspektrum 254; Reflexionsmessungen 266; Sehschärfenmethode 241, 256; Strahlgsmessgn. 50; Verteilg. d. Helligk. im Spektr. 256.
Laporte, Carcellampe 109; Flammenbogenlampe 349; Spiegelapp. 292; Vergl. v. Lichteinh. 141, 142, 145.
— u. Jouaust, Vergl. v. Lichteinh. 140 ff.
Le Chatelier s. Chatelier.
Lebensdauer v. Glühlampen 336.
Lépinay, Macé de, u. Nicati, Meth. z. Vergl. verschiedenfarb. Lichtqu. 234, 238, 241; Purkinjesches Phänomen 62, 230; Sehzeichen 240.
Leslie, 38, $\cos\varepsilon$-Gesetz 80.
Leuchten, Definition 1.
—; infolge v. Lumineszenz 5, Temperaturstrahlung 4.
Leuchtfläche, äquivalente, 93, 174, 404; d. Bild als solche 405, d. Austrittspupille als solche 407.
Leuchtgas 7, Prüfung 381.
— -brenner(-lampe) 7, 109 ff., 152, 351, IX; Strahlung 50.
Leuchttechnik, Ziele der — 53.
Licht, farbloses (weißes) 2, 69; gesätt. 2; intermittier. 205; natürlich. 397; objektiv. 1, 14, 58; polarisiert. 11; subjektiv. 1; s. auch Strahlung.
—, Verhältn. z. Gesamtenergiestr. 49, 50.
— -abgabe 150, V.
— -äquivalent, räumliches, 98 ff.
— -bogen, offener 342, eingeschlossener 10, 347; Abhängigk. v. Spannung und Stromstärke 343.
— -einheit 103, mechan. Äquivalent 52; s. auch Einheitslampen.
— -empfindg. 1, 12, 58, 98; Dauer 206.
— -menge 14.
— -messung s. Photometrie.
Lichtstärke 65, 68; eines Punktes 74, 149; eines Punktsystems 75; eines Flächenelementes 75; einer ausgedehnten Fläche 89; einer ausgeblendeten Fläche 94; eines Scheinwerfers 408.
—, Einheit der — 149, V.
—, hemisphärische, obere und untere, 270; Berechnung 272 ff.; Messung 284—297, 304.
—, mittlere, horizontale, 269, 386.
—, —, räumliche, 270; Berechnung 272 bis 284; Messg.: allgemein 284 bis 309, bei Kohlenfadenlampen 334; Wichtigkeit der — — 284, 334, 381.
—, —, senkrecht z. Lampenachse 269; Messg. bei Kohlenfadenl. 330 ff., 378 ff.
—, —, unter der Poldistanz ϑ 269; Messg. 284 bis 297.
Licht-strahlen 2, 3.
— -strom 1, 68; Einheit 149, V; als Fundamentalgröße 147; Gesamt — — 90, 149, 270.

Licht-quelle, Defin. 1, 3; der gebräuchlichst. 6 ff.; Vergl. in wirtsch. Hins. usw. 360, IX; s. auch Kap. IV u. X.
— -schwächung f. phr. Zwecke, durch Entfernungsänderung 75, 160 ff.; durch andere Mittel 199 ff.
— -theorien 10 ff.
— -verlust, durch Absorption 397, Reflexion 397, Absorpt. u. Reflex. 400 ff.
— —, durch Armaturen 357, Glocken 344, Mattierung 328.
— -verteilung, räuml., 271, Bestimmg. 284—297, 332, 423; senkrecht zur Lampenachse 271, Bestimmg. 328.
— -wirkungen 3.
Liebenthal, Berechnung d. mittl. räuml. Lichtstärke 279 ff.; $\cos\varepsilon$-Ges. 81, 333; Durchbiegen d. Ph.-bank 309; Hefnerlampe 113, 114, 115, 116—121; Lichtverteilg. u. Meth. d. Messg. v. el. Glühlamp. 328 ff.; maximale Beleuchtung 366; Pentanlampen 124 ff.; Siemenssche Einheit 135; Vergl. v. Lichteinheiten 140 ff., vergleichende Prüfung v. Gasglühkörp. 355; Winkelspiegelmeth. 380.
— s. auch Brodhun.
Linsenscheinwerfer 407.
Lippich, Kontrastprinzip 156.
Lommel, $\cos\varepsilon$-Ges. 81, $\cos\varepsilon\cdot\cos i$-Ges. 87, Eindringen des Lichts 20.
Loppé, Beleuchtungskurve 365.
Löwenherz, Amylacetat 114.
Luft, Einfluß auf Hefnerlampe 116 ff., Pentanlampen 125, 128; s. auch 141.
Lumen=Einh. d. Lichtstroms 149, V.
— -meter von Blondel 297.
Lumineszenz 4, 55, 348, 351.
Lummer, Grau- u. Rotglut 4, 72; Interferenzph. 196; schwarz. Körp. als Einheitsl. 139; Viollesche Einh. 134, 140; Ziele d. Leuchttechnik 53.
— u. Brodhun, el. Zwischenlichtqu. 152, Gleichheitsph. 172, Kontrastph. 180, Ph.-bank 309, rotier. Sekt. 207, Spektralph. 266, Talbots Ges. 206, Vergl. verschiedenfarb. Lichts 239, Vergl. v. Lichteinh. 141.
— u. Kurlbaum, 21, 24; Herstellg. d. schwarz. Körp. 42; Platineinheitslampe 136; Zusammenh. zwischen Lichtstärke u. Temp. d. Platins 94.
— u. Pringsheim, Defin. d. Emissionsvermögens 33; Flächenhelle des schwarz. Körp. 139, Herstellg. desselben 43; Leucht. d. Nernstlampe 338, Osmiumlampe 340; Prüfg. d. Strahlgsges. d. schwarz. Körp. u. d. Platins 46 ff.; Temperaturmessgn. 336, 338, 343, 352, 420; Zusammenh. zw. Lichtst. u. Temp. d. schwarzen Körpers 95.
Lummer u. Wien, Herstellung des schwarzen Körpers 41.
Lundquist, Normalspektrum 254.
Lux, H., Beleuchtgsprobl. 368, 370 uf.; rotier. Lampe 381; Metallfadenl. 342.
Lux=Beleuchtungseinheit 149, V.

Macé de Lépinay s. Lépinay.
Magnus, Polarisation 83.
Majorana, Photometerschirm 184.
Malus, Gesetz 204.
Maréchal, Beleuchtungsprobl. 364, 368, 370.
Marks, Annäherungsform. 344, eingeschlossener Lichtbogen 10, Strahlungsmessungen 50.
Martens, Absorptionsapp. 264; Beleuchtungsmesser 194; $\cos\varepsilon\cdot\cos i$-Ges. 88; Gleichheitsph. 190; Kontrastph. 191; opt. Flammenmesser 113; Polarisationsph. 219, 285, 423, 428; Spektralph. v. König 259.
Mascart, 12; Ph. 213, 285, 423; Satz üb. Beleuchtg. geschloss. Räume 375.
Masson, Photometer 198, Unterschiedsempfindlichkeit 155.
Maßsystem, absolutes, 25, 392.
Matte Oberfläche 20.
Matthews, $\cos\varepsilon\cdot\cos i$-Ges. 86, Integralphotometer 306, rotier. Lampe 332, eingeschlossener Lichtbogen 348, Spiegelanordng. 292.
Maxwell, 11, Okularspaltmethode 260.
Melloni, $\cos\varepsilon$-Ges. 80, Strahlmessg. 51.
Meridianebene 268.
Merritt, Strahlg. 25, 50, 51, 52, 100.
Messerschmitt, $\cos\varepsilon\cdot\cos i$-Gesetz 86.
— s. auch Wiedemann.
Metalle, Reflexionsvermögen 265, 266, I.
Metallfadenlampe 154, 340, 360, 381, IX.
Metallreflexion 401, 404.
Meterkerze 147, 150, V.
Methylenlampe 104, 109, 152.
Meyer, O. E., spektralphr. Vergl. 262.
Milchglas 23, 201; $\cos\varepsilon\cdot\cos i$-Ges. 88.
— -ph. Weber 184, 219, 242, 285, 423.
Mitte d. Lampe 75, d. Strahlungsqu. 31.
Mittlere Lichtstärke s. Lichtstärke.
Möller, $\cos\varepsilon$-Ges. 81, Polarisation 84.
Monasch, Kugelphotometer 304.
Monnier, phr. Vergl. 145.

Nakano, Strahlungsmessungen 50.
Naphtalinlampe von Broca 130.
Napoli, rotierender Sektor 207.
National Physic. Laboratory, 140 ff.
Nernst und Bose, Gasglühlicht 352.
Nernstlampe 9, 50, 338, IX.
Nerz, Lichtverlust 344.
Netzhaut 56; Reiz der — 1, 12, 14, 58.
Neumann, Schwingungsebene 40.
Nicati s. Lépinay.

Nichols, 25; Reflexionsmessungen 266; Strahlungsmessungen 50, 51.
— u. Franklin, spektralphr. Vgl. 263.
— s. auch Rubens.
Nicolsches Prisma 203.
Niederländ. s. holländ.
Normal-element 315.
— -lampen 152; geeign. Ausstrahlgs-richtg. f. el. — — 154, 330; Kontrolle d. el. — — 153, 232.
— -photometer 311.
— -spektrum 26, 251; Reduktion auf dasselbe 254.

Objektives Licht 1, 14, 58.
Ökonomie 98, IX.
Okularkreis 200, 406.
Okularspalt 251, -methode 260.
Optisches System zentrierter Flächen 56, mittelbare Lichtstrahlung 405.
Orthotroper Körper 79, 88; dessen Beleuchtung 92, 187, 297.
Osminlampe 341.
Osmiumlampe 9, 154, 238, 340, IX.
Osramlampe 341, IX.

Pagliani, Photometer 198.
Papier 21, 23; cos ε · cos i-Gesetz 85, 87, 88, 189.
Parabolspiegel 410.
Parallelschaltung von Glühlampen, Streckersche Methode 380.
Paschen, Strahlungsgesetz 48.
Paterson, 10-Kerzen-Pentanlampe 128; Vergl. v. Lichteinheiten 140 ff.
Pegram, cos ε · cos i-Gesetz 86.
Pentan 104, Herstellg. 129, Einfluß 129.
— -einheit 146.
— -lampen 122—130; Vergl. mit anderen Einheitslampen 141—146, XII.
Pérot u. Janet, Vgl. v. Lichteinh. 140.
Perry u. Ayrton, Spiegelanordnung 290, Zerstreuungslinsen 201.
Petavel, Einheitslampe 134, 137, 139; Überlegenh. d. Gleichstrombog. 347.
Petroleum-lampe 6, 152, 358, 427, IX.
— -glühlicht 8, 359, IX.
Photometer, Babinet 217; Bechstein 246; Becquerel 215; Beer 215; Bernard 215; Blondel 297, 304; Blondel-Broca 214; Bouguer 161, 212; Brace 267; Brodhun 224; Brücke 183; Bunsen 165; Conroy 164; Cornu 212; Crova 212, 259; Dibdin 286; Elster 164, 286; Foucault 161; Gas Referees 162; Glan 258; Glazebrook 259; Grosse 236; Houston und Kennelly 309; Hüfner 259; Jamin 215; Joly 164; König 259; Königsberger 259; Krüss 235, 248; Lambert 160; Lummer 196; Lummer-Brodhun 172, 180, 266; Martens 190, 219; Mascart 213; Masson 198; Matthews 306; Pagliani 198; Ritchie 162; Rood 246; Simmance u. Abady 247; Thompson 164; Trannin 259; Vierordt 257; Villarceau 163; Weber 184, 219; Wheatstone 198; Whitman 245; Wild 217, 259; Wybauw 235; Zöllner 215.
— s. auch Beleuchtungsmesser.
Photometer-bank, gerade 163, 285, 309 ff.; optische Achse 310; verschiebbare 326; s. auch Versuchsanordngn. u. VII.
— -felder 157.
— -räume 323 ff.; Aufzug in der Reichsanstalt 228, 287, 324.
Photometrie, Aufgaben der praktischen — 70; heterochrome 231.
Photometrisch, Definition 14.
Photometrische App., Auswahl 422.
— Einstellung, Berechng. d. Genauigk. 169; v. Farbenblind. 230; s. auch 423.
— Gesetze, s. cos i-, cos ε-, cos ε · cos i-, Entferngs.- u. Grundges.; Folgergn. 89.
— Größen 68; — und Einheiten, Vereinbarungen 146—150, V.
— Messungen, Prinzip 156.
Physiologisch. Absorptionsvermögen 58, 63, 65, 69.
— Energie 58, Größen 68.
— Lichtschwächungsgesetz 205 ff.
— Wert des Lichtes 1.
— Wirkg. d. Lichts a. d. Auge 56—73.
Pickering, spektralphr. Vergl. 262.
— s. auch Pritchard.
Pigeonlampe 109.
Planck s. Wien.
Planparallele Schicht (Platten), Auftreffen von Licht 17, 399 ff.
Plateau, Talbotsches Gesetz 206.
Platin, 1, Änderung der Lichtstärke m. der Temperatur 94; Strahlgsges. 47 ff.
— -Einheitslampen 132—137.
Poisson, cos ε-Gesetz 81.
Polarisation, Gesetz v. Brewster 202, Fresnel (Reflexionsformeln) 396, Malus 204; s. auch Schwinggsebene.
Polarisiertes Licht 11, Herstellung 202.
Poldistanz 269, 394.
Polimanti, 238, Flimmerphie. 244.
Potter, Eisenwiderstand 338.
Pyr 145.
Preece, Beleuchtungseinheit 147, Beleuchtung von Innenräumen 378, el. Zwischenlichtqu. 152, Lebensdauerprüfung v. Glühlampen 337.
— u. Trotter, Beleuchtgsmesser 210.
Pringsheim, Abweichungen von d. reinen Temperaturstrahlung 5, Ziele der Leuchttechnik 53.

Pringsheim s. auch Lummer.
Pritchard u. Pickering, Rauchglaskeil 202.
Provostaye u. Desains, $\cos\varepsilon\cdot\cos i$-Ges. 85; Emission u. Absorpt. 38; Polarisat. 83; Reflexionsmessg. 84, 266.
Prozentuelle Größen 387.
Psaroudaki s. Blondel.
Psychrometer 322.
Punkt, Definition 26.
Pupille 56, 405; Eintritts- 405.
Purkinjesches Phänomen 61 ff., 230.
Pyrometer 421.

Quecksilber-amalgam an Glas, Reflex. I.
— -bogenlampe 5, 10, 350, IX; Strahlung 50.
Quincke, Eindringen d. Strahlen 20.

Raps, Kompensationsapparat 318.
Rasch, Abhängigkeit der Lichtstärke von der Temperatur 97; Elektrolytbogenlampe 10, 349.
Rauchglas 22, 201, 398, 421, 422.
Raumwinkelmesser 195.
Rayleigh, 13, Reflexionsmessungen 266, gegen Wright 86.
v. Recklinghausen, Hg-Bogenl. 351.
Reflexion, diffuse, 15, 19 ff.; Metall- u. Total- 401, 404; regelmäß., 15, 19 ff.; selektive, 20; vollkomm. diff., 80.
Reflexions-gesetz 15, 396.
— -koeffizient 79, 91.
Reflexionsvermögen, diffuses, 16, 20, 91; mittleres — — 376; Messung 426, II.
—, energetisches und phr., 19.
—, Oberflächen- 18, 397.
—, regelmäßiges, 16; Berechng. 20, 400; Messung 265, 266, 289, 290, 426, I.
Regelmäß. Durchlässigk. s. Durchl.
Regnault s. Dumas.
Reichsanstalt, Abblend. fremd. Lichts 313 ff.; Anordnung bei Benutzg. d. Meth. v. Hartley 287, v. Perry u. Ayrton 292; Beglaubigg. d. Hefnerl. 112, 411; Benutzg. d. Kubizierapp. 320; Festsetzg. d. deutsch. u. engl. Kerze 141; bläul. Glasplatten 153, 231; Glühlampensatz 153, 232; Lampenstativ 297; Lichtverteilg. u. spez. Verbr. s. Kap. X; Ph.-bank 311, verschiebbare 326; Ph.-raum 323; Prüfg. v. Amylacetat 114, el. Glühlamp. 381, Pentan 129, 10-Kerz.-Pentanl. 128; Vergl. v. Lichteinh. 140—145; vergl. Prüfg. v. Gasglühlichtkörpern 354 ff.
Reizschwelle 65, 155.
Relative Größen 387.
Retschinski s. Küch.
Ritchie, Ph. 157, 162, 163.
Rogers, spektralphr. Vergleich 263; Strahlungsmessungen 50, 51.
Rood, Flimmer-prinz. 244, -ph. 246.
Rotglut 3, 72.
Rotier. Lampe 294, 306, 332, 381.
— Sektor 206 ff.
— Spiegelapp. v. Brodhun 331, 381, 426.
Rousseau, Berechnung der mittleren räuml. Lichtstärke 283, Lampenstativ 297, relative Messungen 295.
Rowden s. Webber.
Rubens, 24, Reflexionsmessungen 266, Theorie des Gasglühlichts 352.
— u. Aschkinass, 12, 26.
— u. Kurlbaum, Wiensches Ges. 46.
— u. Nichols, 26.
— s. auch Hagen.
Rüdorff, 152, Spiegel 165.
Rumford, Lambertsches Ph. 160.

Sabine, Rauchglaskeil 202.
Saint, Albedo II, z. Abblenden fremden Lichts 313.
Savart, Polariskop 217.
Schattenwerfvorrichtungen 288.
Schaum, Zusammenhang zwischen Ökonomie und Temperatur 98, 102.
Scheinwerfer, Linsen — 407.
Schilling, photometrische Vergl. 45.
Schmidt u. Haensch 224, Reflexionsprisma 176, Schattenwerfvor. 288.
Schönrock s. Brodhun.
Schott u. Genossen, Milchglas 23, 344; Uviollampe 351.
— u. Herschkowitsch, Lichtverlust 344.
Schulze, G., Temperaturmessungen 336, 338, 340, 357.
— s. auch Kurlbaum.
Schumann, spektralphr. Messgn. 262.
Schwächung d. Lichts s. Lichtschwächg.
Schwarze Strahlung 41.
— Temperatur 421; im Rot 422.
Schwarzer Körper 20; $\cos\varepsilon$-Ges. 32, 39; Einheitslampe 139; Herstellg. 41 ff.; räuml. Lichtäquival. 100; Strahlungsgesetze 43 ff.; Zusammenhang zwischen Lichtstärke und Temperatur 95, 96.
Schwendler, Platin-Einheitsl. 132.
Schwingungsebene des Lichts 40, 41, 203, 397, 400; Bestimmg. der — 222.
Secchi, rotierender Sektor 207.
Seeliger, $\cos\varepsilon\cdot\cos i$-Ges. 86, 87; Defin. d. Albedo 21; diffuse Reflexion 20.
Sehnerv 57; Reizung durch objektives Licht 1, 14, 58.
Sehpurpur 57, 71.
Sehschärfenprinzip 240.
Sektor, rotierender, 206 ff.
Selektive Absorption 65, 202; Körper

zur Verbesserung des Leuchteffekts 54; Reflexion 20, 21.
Sharp, rotierende Lampe 332, Spiegelanordnung 294, Tantallampe 341.
Sichtbarer Energiestrom 14.
Siemens, W. v., Empfehlung der Hefnerlampe 147, Platinlampe 135, Sehschärfenprinzip 240.
Siemens u. Halske, 9, 10; drehbare Photometerbank 285.
Silber, $\cos \varepsilon$-Ges. 81, $\cos \varepsilon \cdot \cos i$-Ges. 85, Durchlässigkeit 22, Reflexionsvermögen I.
Simmance u. Abady, Flimmerphotometer 247.
Simonoff, verstellbare Blenden 213, Sehschärfenmethode 241.
Smoluchowski de Smolan, $\cos \varepsilon$-Gesetz 81.
Snellius, Brechungsgesetz 17.
Soleil, Polariskop 217.
Sonne, spektralphotometrische Messungen 256, 261 ff.; Strahlung 50.
Spalt 250; Doppel- 257, bilateraler 258; Okular- 251.
Spannkraft d. Wasserdampfes 116, III.
Spannung, elektrische, Einfluß der Änderung der — 336, 340; — u. Lichtst. 345, 347, 349; Messung 317.
Spektral-gleichungen 45, 46.
— -photometer 257—267.
— -photometrische Anordnung von Hagen u. Rubens 264.
Spektroskop 250, Spiegel- 256.
Spektrum, Helligkeit 252; Helligkeitsverteilung im — 255; Herstellung 26, 250; Normal- 26, 251, Reduktion auf dasselbe 254.
Spezifischer Verbrauch 327.
Spezifisches Gewicht, Bestimmung 321.
Spiegel, zur Bestimmung der räumlichen Lichtverteilung 288—295.
— -apparat, rotierender, v. Brodhun 331, 381, 426.
— -metalle s. Metalle.
Spiritusglühlichtlampe 8, 359, IX.
Spitta, Rauchglaskeile 202.
Sprungsche Formel 117.
Stäbchen 57, 71 ff., 230.
Stative für elektrische Glühlampen 296.
Staub, Strahlgsmessgn. 25, 52.
Stefan-Boltzmannsches Ges. 44, 46.
Steinheil, Unterschiedsempfindlichk. 155, Sternphotometer 213.
Stenger, Empfindlichk. des Auges 72.
Stern, Lebensdauer v. Glühlamp. 337.
Sternphotometer 213.
Stewart, Absorption und Emission 38, Strahlungsmessung 50, Temperaturmessung 357.
— u. Hoxie, Strahlungsmessung 50.
Stort, Lichtverlust 344.
Strahlen-gang, Begrenzung des — durch Blenden 405, im Ph.-würfel 173.
— -gruppen 1.
Strahlung, homogene und gemischte, 2; schwarze, 41.
Strahlungs-energie 14.
— -gesetze, des schwarzen Körpers 44, des Platins 47; Folgerungen 49.
— -messung 23 ff.
— -stärke eines Flächenelementes 31, Punktes 27, Punktsystemes 31.
Straßen-beleuchtung 370 ff.
— -photometer von Brodhun 224, 285, 381, 423, 428.
Strecker, Beleuchtung von Innenräumen 377, Kompensationsphotometer von Krüss 235, Lebensdauer von Glühlampen 337, Parallelschaltung von Glühlampen 380.
Stromstärke, elektrische, Einfluß der Änderung der — 152, 317, 336, 340; — u. Lichtst. 345, 347; Messung 316.
Subjektives Licht 1.
Substitutionsmethode 159, 167, 232, 238.
Sugg, Argandbrenner 126, 383.
— s. auch Kirkham.
Sumpner, Messungen von Albedos 21, 426, II.
Swan, Photometer 172.
Swinburne, Kraterlampe 138.
System, von strahlenden Punkten 30; von leuchtenden Punkten (Lichtquellen) 75, 92, 366; siehe auch Optisches System.

Talbot, Gesetz 205, rotierender Sektor 207.
Tantallampe 9, 341.
Temperatur, absol., 43; schwarze, 421; in rot. Licht 422; Zahlenwerte 49, 97, 99, 100, 336, 338, 340, 343, 352, 357.
—, Einfluß auf Lichtstärke 94 ff., Ökonomie 98 ff.; s. auch Strahlungsgesetze.
— -erhöhung zur Verbesserung des Leuchteffektes 55.
— -koeffizient 337, 338.
— -messung 419 ff.
— -strahlung 4.
Thermactin 4.
Thermosäule 24.
Thaler, $\cos \varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz 87.
Thiesen, schwarze Strahlung 41.
Thompson, S. P., Gleichwertigkeit von Gleich- und Wechselstrom 347; Kraterlampe 138; Kratertemperatur 138, 342; Lichtbogenspannung 343; Photometer 164.
Thomsen, Strahlungsmessungen 50, 51, 53.
Thoroxyd 5, Einfluß 353.

Töpler, Bunsenschirm 166.
Trannin, Spektralphotometer 259.
Trotter, Erklärg. d. Lichtverteilung bei Bogenlampen 343, Ph.-schirm 184, Wandern des Kraters 139.
— s. auch Preece.
Trowbridge, Reflexionsmessung 266.
Trübe 17, 22, 23.
Tumlirz, Strahlungsmessungen 25, 50, 51, 53.
Tyndall, Strahlungsmessungen 50.

Ulbricht, Kugelphotometer 301.
v. Uljanin, $\cos i$-Gesetz 83.
Ultrarot 2, 12, 22, 26, 49, 266.
Ultraviolett 2, 12, 24, 26, 351.
Umlegen des Ph. 158, 166, 176.
Umlegungsmethode 177.
Undulationstheorie 10.
Ungleichseitigkeit des Ph. 158, 178.
Unterschied, relativer u. prozentueller, 387.
Unterschieds-empfindlichkeit 155.
— -schwelle 65; relative 155.
Uppenborn, Beleuchtungsprobleme 362, 370, 372; elektrische Zwischenlichtquelle 152, 190; Giroudlampe 111; Lichtverteilung der Wechselstrombogenlampe 346; Metallfadenlampe 342.
Utzinger, Lichtverlust 344.
Uviollampe 351.

Valentiner s. Holborn.
Verband deutscher Elektrotechniker, Beschlüsse 148, Nutzlebensdauer v. Glühlampen 337, Winkelspiegelmethode 378.
Verbrauch, Gesamt- und spezifischer, 327.
Verbrauchsmessungen 106, 109, 321.
Verbrennungswärme 52, 320.
Vereinbarungen über photometrische Größen und Einheiten 146, 150, V.
Vergleich von Lichteinheiten 140—146, XII; von Lichtquellen in wirtschaftl. Hinsicht usw. 360, IX; spektralphotometrischer — v. Lichtquellen 262.
Vergleichs-felder, photometrische, 157, Einfluß der Größe 230.
— -lampe 151, 159, 160.
Verkaufsstelle Vereinigter Glühlampenfabriken, Liefergsbedinggn. 337.
Verlust s. Lichtverlust.
Verschiebungsgesetz von Wien 45.
Versuchsanordnungen bei Benutzung einer Photometerbank 163, 311 ff., 390 ff., 424 ff.
Vierordt, Absorptionsmessung 398, Doppelspalt 257, Helligkeitsverteilung im Spektrum 255, Spektralphotometer 257.
Villarceau, Keilphotometer 163.
Violle, Acetylenlampe 131; $\cos \varepsilon$-Ges. 81; Flächenhelle des Kraters 138; photometrische Vergleiche 140, 145; Platin-Einheitslampe 133; Temperaturmessung 343.
Visier von v. Hefner-Alteneck 113, 414, 417.
Vogel, spektralphotometrische Vergleiche 262.
Voit, Ausstellungsbericht 276.
Volkmann, Unterschiedsempfindlichkeit 155.
Voller, Kompensation von Lichtverlusten 201.
Vorschriften für die Prüfung von elektrischen Glühlampen 378, von Gasglühlichtkörpern 384, von Leuchtgas 381.

Wanner, Kratertemperatur 343, Pyrometer 421.
Warburg, allactin, thermactin 4.
Wärmedurchlässigkeit 21.
Wärmestrahlen 2.
Watt-sekunde 25; -stunde IX.
Webber u. Rowden, photometrischer Vergleich 145.
Weber, E. H., u. Fechner, psychophysisches Gesetz 156.
—, F., Grau- und Rotglut 3, 72.
—, L., Beleuchtungsprobleme 362, 364, 371; Dachphotometer 184; Einheit der Beleuchtung 147, der Flächenhelle 150; indizierte Helligkeit 149; Milchglasphotometer 184, 219, 242, 285, 423; photometrische Größen und Einheiten 148; Raumwinkelmesser 195; Sehschärfenmethode 242, VI, s. auch 193.
Wechselstrombogenlampe 346 ff.
Wedding, photometrische Messungen an Bogenlampen 345, 346, 347; physikalischer Wirkungsgrad 51; Vergleich zwischen Gleich- und Wechselstrombetrieb 347, 349; Vergleich zw. d. verschiedenen Lichtquellen in wirtsch. Hinsicht 361.
Weißes Licht 69; Medium 20, 22, 23.
Weißglut 3.
Wellenlängen 12, 262, 350.
Westonelement 315.
Wheatstone, 24, Photometer 198.
Whitman, Flimmerphotometer 245.
Wiedemann, E., Lumineszenz 4.
— u. Messerschmitt, Talbotsches Gesetz 206.
Wien, Spektralgleichung 46, Verschiebungsgesetz 45.
— s. auch Lummer
— Plancksche Spektralgleichung 45.
Wiener $\cos \varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz 86.

Wild, Polarisationsphotometer 217, 239; Spektralphotometer 259.
Wilson u. Gray, Kratertemperatur 343.
Wingen, Beleuchtungsmesser 192, 211.
Winkel, gewöhnlicher, 392; räumlicher, 27, 393, dessen Brechung 395.
— -photometer von Elster 286.
— -spiegelmethode 378 ff.
Wirkungen des Lichts 2.
Wirkungsgrad, physikalischer, 51; technischer, 98, 101.
Wolff, Kompensationsapparat 319.
Wolframlampe 341.
Wollaston, Prisma 258, 259.
Wright, $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz 86.
Wybauw, Annäherungsformel 344; Beleuchtungsprobleme 362, 363, 368, 370; Kompensationsmethode 235.

Young, Farbentheorie 71.

Zapfen 57, 72, 73, 240.
Zeidler 370.
Zerstreuung des Lichts 15 ff.
Zerstreuungslinse 201.
Zirkon-lampe 9, 342; -licht 5.
Zöllner, Albedo 21, Messung 427, II; $\cos\varepsilon$-Gesetz 81; $\cos\varepsilon \cdot \cos i$-Gesetz 86; Photometer 215; Platinlampe 132.
Zwillingsprisma 190, 191, 220, 259, 264.
Zwischenlichtquellen 151 — 154.

Fünftes Heft:

Die asynchronen Drehstrommotoren, ihre Wirkungsweise, Prüfung und Berechnung von Dr. **Gustav Benischke.** Mit 2 farb. Taf. und 112 Abbild. Preis geh. *M.* 5.50, geb. *M.* 6.—.

Elektrotechnische Zeitschrift: . . . Das Buch ist durchweg flüssig und leicht verständlich geschrieben. . . . Der Studierende wird aus der eleganten Art, in der bald die Kraftfelder selbst, bald die Selbstinduktionskoeffizienten eingeführt werden, lernen, beide Methoden gleichzeitig zu erfassen.

Sechstes Heft:

Die elektrischen Bogenlampen, deren Prinzip, Konstruktion und Anwendung von **J. Zeidler.** Mit 130 Abbild. u. 1 Kurventafel. Preis geh. *M.* 5.50, geb. *M.* 6.—.

Elektrotechnik und Maschinenbau: . . . Das Werk wird seiner Aufgabe durchaus gerecht und kann wärmstens empfohlen werden. Lob verdient auch die gute Ausstattung, insbesondere die ungewöhnlich klaren und schönen Abbildungen.

Siebentes Heft:

Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven von Professor Dr. **Ernst Orlich.** Mit 71 Abbildungen. Preis geh. *M.* 3.50, geb. *M.* 4.—.

Elektrische Bahnen und Betriebe: Dieser neue Band der Benischkeschen Sammlung „Elektrotechnik in Einzeldarstellungen" stellt eine wichtige Bereicherung unserer Literatur dar. Von welcher praktischen Bedeutung das hier behandelte Gebiet ist, wird durch ein Beispiel recht einleuchtend, von dem erst jüngst in der Fachpresse berichtet wurde; es handelte sich um eine unerträgliche Lärmerscheinung, die an Bogenlampen beobachtet wurde, die an ein gewisses größeres Drehstromnetz angeschlossen waren. Als Ursache ergab sich, daß die Spannungskurve einen überaus unglücklichen Verlauf hatte, insofern, als durch ungünstige Nutung des Generators Obertöne in der Welle enthalten waren, deren hoher Puls das bekannte Tönen des Lichtbogens hervorrief.

Ein unmittelbarer Anlaß zum Studium dieser Erscheinungen liegt also unbestritten vor. Andererseits bietet jedoch dieses Wissensgebiet eine ganz beträchtliche Reihe nicht bloß mathematischer, sondern auch experimenteller Schwierigkeiten, deren Überwindung dadurch erschwert ist, daß die Literatur in allen möglichen Zeitschriften zerstreut ist. Um so verdienstvoller ist daher die vorliegende Arbeit, die die Literatur nicht bloß sammelt und sichtet, sondern auch selbständig durchdringt, da der Verfasser durch eigene theoretische und experimentelle Arbeiten auf diesem Gebiete die Schwierigkeiten kennt wie wenig andere.

Achtes Heft:

Lichtstrahlung und Beleuchtung von **Paul Högner.** Mit 37 Abbildungen. Preis geh. *M.* 3.—, geb. *M.* 3.50.

Annalen der Elektrotechnik: Das Bändchen soll den Elektrotechniker bei der Projektierung und Ausführung von Beleuchtungsanlagen, insbesondere bei der Wahl, Verteilung und Bestimmung der Stärke der Bogenlampen, unterstützen.

Der Verfasser hat es verstanden, die nicht leichten Probleme in vorzüglicher Weise zu behandeln, weshalb wir das Buch allen, welche mit Beleuchtungsprojekten zu tun haben, oder welche sich über die bei künstlicher Beleuchtung in Betracht kommenden Momente unterrichten wollen, bestens empfehlen können.

Neuntes Heft:

Die elektrischen Bahnen und ihre Betriebsmittel von Dipl.-Ing. **Herbert Kyser.** Mit 73 Abbild. u. 10 Tafeln. Preis geh. *M.* 5.50, geb. *M.* 6.—.

nschweig.

ysik

Auflage

raz.

Wärme),
smuth-Graz
Hann-Wien
zitätslehre),
A. Nippoldt-
).

rbendruck.

Prof. Dr.
n Halbfrz.

enden
Lummer.

hysik,
gie von
Drucker,
. Hann.

Das altberühmte Buch genießt längst den Ruf, das beste populäre Lehrbuch der Physik zu sein, dem anerkanntermaßen keine andere Nation ein gleichartiges Werk zur Seite zu stellen vermag. Es ist seit seinem ersten Erscheinen in den Kreisen der Physiker, Astronomen, Naturhistoriker, Mediziner, Pharmazeuten, Lehrer, Techniker, Elektrotechniker, Mechaniker, Optiker, Agronomen, Industriellen, sowie Forst-, Berg- und Hüttenleute und aller Liebhaber der Physik so eingebürgert, daß es einer weiteren Empfehlung nicht bedarf.

Es ist Vorsorge getroffen, daß die übrigen Bände des Werkes baldmöglichst nachfolgen werden.

Zu beziehen durch alle Buchhandlungen.



Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn

Dr. J. Fricks
Physikalische Technik

oder Anleitung zu Experimentalv… …gen sowie zur Selbstherstellung einfacher D… …ationsapparate.

Siebente vollkommen umge… …tark vermehrte Auflage

Dr. O… …ann,

Professor der Physi… …ochschule in Karlsruhe.

…en.

…d.

Mit 2908 … …ldnis des Verfassers. In zwei A… … geh. ℳ 40.—, geb. ℳ 44.—.

… — **Erste Abteilung.**

…nd drei Tafeln. Lex.-Format. Preis … ℳ 20.—, geb. ℳ 22.—.

Der physikalische Unterricht stellt an das technische Können des Experimentators sehr erhebliche Anforderungen. Während nun aber der Ingenieur in seiner Studienzeit eingehende Belehrung über alle Einzelheiten des von ihm gewählten Berufes empfängt, ist die Ausbildung des Physikers, abgesehen von der Ausführung von Laboratoriumsversuchen in kleinstem Maßstabe, eine rein theoretische, technisch unzulängliche. Die Technik der Experimentalvorträge, namentlich bei größeren Zuhörerzahlen, ist eine wesentlich andere als die der Laboratoriumsversuche und häufig nicht nur ähnlich der Tätigkeit des Ingenieurs, sondern sogar noch schwieriger, da es sich nicht um Aufstellung und Inbetriebsetzung fertig durchgebildeter, allen Anforderungen an Betriebssicherheit entsprechender Maschinen handelt, sondern um sehr unvollkommene, zuweilen in ihrer Handhabung geradezu gefährliche Versuchsapparate. Zum Teil beruhen diese Schwierigkeiten in der Natur der Sache, in dem raschen Fortschritt der Wissenschaft, zum Teil aber in jenem althergebrachten Vorurteil, welches dem Physiker, weil er Philosoph nicht Techniker ist, zumutet, mit vorgeschriebenen, meist absolut unzulänglichen Mitteln zu arbeiten, während der Ingenieur in der Lage ist, eine Kostenberechnung aufzustellen, wie sie den jeweiligen tatsächlichen Verhältnissen entspricht.

Im Hinblick auf diese Schwierigkeiten will das Buch dem Lehrer der Physik eine gewisse Erleichterung bieten einesteils durch Darlegung der erforderlichen technischen Einrichtungen und Werkzeuge, sowie ihrer Anwendung, anderenteils durch Zusammenstellung der meist gebräuchlichen physikalischen Apparate nebst Angabe ihrer Bezugsquellen und Preise. Auch dem Fabrikanten von Apparaten sucht es nützlich zu sein, insofern es auf Bedürfnisse des Unterrichts hinweist, welchen die vorhandenen Konstruktionsformen noch nicht genügen, um so zu weiterer Ausgestaltung derselben und Ausarbeitung neuer Formen Anregung zu geben.

Auf solche Weise zur Förderung des physikalischen Unterrichts beizutragen, war bereits das Streben von *Joseph Frick*, dessen Bildnis den ersten Band schmückt. Der Herausgeber war bemüht, das Werk in gleichem Sinne weiter zu führen. Der zweite Band, dessen erste Abteilung erschien, ist als Manuskript fertiggestellt; die Fortsetzung befindet sich im Druck, so daß der Schluß des Werkes im Frühjahr 1909 zu erwarten ist.

Zu beziehen durch alle Buchhandlungen.

